

# 深远海发展趋势下的海上风电战略 环评指标体系研究

郑健<sup>1</sup>, 高程硕<sup>2</sup>

(1. 复旦大学中国历史地理研究所 上海 200433; 2. 上海勘测设计研究院有限公司 上海 200335)

**摘要:** 海上风电在推动能源转型, 助力实现碳中和目标方面发挥着重要保障作用, 但海上风电深远海发展也为环评工作带来更高要求。《中华人民共和国海洋环境保护法》(2023年修订)明确要求涉海建设规划必须开展战略环评工作, 而行业现有的一些环境影响评价指标体系在应对新政策、新要求上缺乏适应性和针对性, 在规划层次和项目层次上也缺乏一致性。文章采用现状调研和专家咨询等方法, 系统梳理了深远海发展趋势下海上风电开发、建设、运营各环节的环境影响, 依据驱动力—状态—响应(DSR)框架, 提出了一套涵盖社会可持续发展、环境状况改善、生态安全维护、气候变暖缓解、资源与能源高效利用、环境管理及事故风险等方面的指标体系。该指标体系关联了战略环评指标和项目环评指标, 同时考虑了海上风电项目生命周期和设备生命周期的环境影响, 为国家深远海海上风电开发战略和项目实施提供参考。

**关键词:** 海上风电; 战略环评; 指标体系; 全生命周期; 深远海

中图分类号: TM614; X820.3; P736 文献标志码: A 文章编号: 1005-9857(2026)02-0067-11

## Research on the Indicator System for Strategic Environmental Assessment of Offshore Wind Power Under the Trend of Deep-Far Offshore Development

ZHENG Jian<sup>1</sup>, GAO Chengshuo<sup>2</sup>

(1. Center for Historical Geographical Studies, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

**Abstract:** Offshore wind power plays a crucial role in promoting the energy transition and contributing to the achievement of carbon neutrality goals. However, development of offshore wind power toward deeper and farther offshore areas also imposes higher demands for environmental impact assessment. The Marine Environment Protection Law of the People's Republic of China (2023 Revision) explicitly requires that marine-related construction plans undergo strategic environmental impact assessments. Nevertheless, the existing environmental impact assessment indicator systems in the industry lack adaptability and specificity in responding to new policies and requirements, as well as consistency between planning and project levels. Through methods

such as literature review and expert consultation, this study systematically examines the environmental impacts of offshore wind power development, construction, and operation in the context of the trend toward deep-far offshore development. Based on the Driver-State-Response (DSR) framework, a comprehensive indicator system is proposed, covering aspects such as sustainable social development, improvement of environmental conditions, maintenance of ecological security, mitigation of climate warming, efficient utilization of resources and energy, environmental management, and accident risks. This indicator system links strategic environmental assessment indicators with project-level environmental assessment indicators. It also appropriately considers the environmental impacts throughout the lifecycle of offshore wind power projects and equipment, providing a reference for national-level strategies and project implementation of deep-far offshore wind power development.

**Keywords:** Offshore wind power; Strategic environmental assessment; Indicator system; Full life cycle; Deep-far offshore

## 1 研究背景

加快发展海上风电是实现中国“碳达峰、碳中和”目标,履行《巴黎协定》承诺,优化能源结构及促进海洋经济高质量发展的国家战略举措。随着近海风电场可开发区域逐渐饱和,储量丰富的深远海风资源成为下一步开发的重点方向。近年来,我国已出台包括“双三十”在内的十余项深远海风电相关鼓励政策和要求<sup>[1]</sup>。然而,海上风电开发规模大、链条长,且深度介入海洋环境,其对海洋生态系统产生的潜在影响复杂而深远。相较于近海,深远海海洋环境在环境承载力和资源承载力上更为脆弱,适用于深远海的风电设备、技术和产品也有所差异,致使相关环境管理面临严峻挑战。依据《海上风电场工程预可行性研究报告编制规程》(NB/T 31031—2019),水深大于 50 m(以理论最低潮位为基准),场区离海缆路由登陆点所在岸线最近距离大于 65 km 的风电场属于深远海风电场。从全球范围来看,深远海风电场多位于海洋专属经济区,甚至远达公海。截至 2022 年,我国深远海风电累计装机容量已经位居世界前四<sup>[2]</sup>,但在专属经济区,目前尚缺乏明确针对海上风电的主体规划、环境治理法规和环境评价体系;较领海而言,主权国在专属经济区内享有的权利相对较弱,需要加强管理以避免国际法律纠纷。在公海领域,《联合国海洋法公约》下国家管辖范围以

外区域海洋生物多样性的养护和可持续利用协定》(以下简称《海洋生物多样性协定》)在 2026 年 1 月 17 日已正式生效,为海洋环境治理提供了基本框架。

鉴于未来深远海开发将涉及广阔海域(如专属经济区乃至公海),其环境影响具有跨区域的累积效应,已超越省级规划范畴。因此,必须在国家战略层面开展宏观的环境影响评估与指导,实施总体规划统筹开发<sup>[3]</sup>。战略环境影响评价(Strategic Environmental Assessment, SEA)是基于政策、规划方案的环境影响评价<sup>[4]</sup>,作为在规划和政策层面整合环境考量的关键工具,对引导深远海海上风电可持续发展至关重要。在法律层面,2023 年新修订的《中华人民共和国海洋环境保护法》第十三条已以立法的形式明确提出开展海洋领域战略环评的要求;《海洋生物多样性协定》第三十九条也明确了对 SEA 的要求,并建议将其作为项目环评的前置条件<sup>[5]</sup>。在规范层面,最新发布的《环境影响评价技术导则 海洋生态环境》(HJ 1409—2025)(以下简称“新导则”)也明确规定“规划环境影响评价中的海洋生态环境影响评价参照本标准执行”(第 1 条)<sup>[6]</sup>。我国海上风电领域已有的环境影响评价技术规范主要有能源行业标准《海上风电场工程规划环境影响评价报告编制导则》<sup>[7]</sup>和国家海洋局发布的内部技术文件《海上风电工程环境影响评价技术规范》(2014 年),这两份文件针对的是省、

市级的规划环评和项目环评,内容比较简略,在指标方面仅提供了评价类别,且核心部分都依据《海洋工程环境影响评价技术导则》(GB/T 19485—2014),而后的海洋生态环境影响评价内容较为陈旧,现已被新导则替代。因此,现行海上风电环评技术标准在适用范围上较为局限,在合规性上存在滞后,在操作上也缺乏指导性。可以说,目前仍缺乏一套专门针对国家层面海上风电战略并适应深远海新趋势要求的、操作性强的SEA评价指标体系,这一缺失限制了SEA在海上风电领域有效作用的发挥。

此外,SEA虽在宏观层面设定环境保护目标和要求,但这些目标的最终实现仍依赖于微观层面(具体项目)的有效落实和层层推进。如果缺乏与SEA相衔接的环境影响评估(Environmental Impact Assessment, EIA)指标,战略层面的环境考量很容易在项目实施阶段被削弱或忽略。从操作层面来讲,若SEA和EIA使用完全独立的指标体系,会导致评价重点不一、标准冲突、数据重复收集等问题,进而降低整体评价效率。建立一套相互关联、核心指标一致的体系,可以规范评价流程、统一评价尺度,以及减少不必要的重复工作,也有助于更好地满足最新法规的要求,形成更完善的环境管理闭环。

鉴于当前深远海趋势下海上风电SEA指标体系尚存空白,本文系统梳理环境影响因素,基于驱动力—状态—响应(Driving force-State-Response, DSR)理论框架,研究并提出一套全生命周期考量、兼顾项目环评指标的海上风电战略环评指标体系。该体系的构建过程、具体内容及应用探讨构成了本文的主要研究内容。这套指标体系旨在为海上风电规划优化和环境管理决策提供科学支撑,推动其环境友好、气候适应和可持续发展。

## 2 文献综述

### 2.1 海上风电战略环评的必要性及指标体系框架研究

SEA作为政策、规划和计划层面早期介入的环境管理工具,能够前瞻性地识别和评估潜在环境影响,优化决策,有效弥补项目环评的局限性<sup>[8]</sup>。目

前国内外广泛采用“驱动力—状态—响应(DSR)”模型及其衍生模型作为环评指标体系构建的基础框架<sup>[9]</sup>。DSR模型清晰地刻画了“原因—结果—对策”的逻辑链条,有助于系统地理解人类活动与环境系统的复杂互动关系。国内外的研究已将DSR或类似框架应用于不同领域的环境评价指标体系构建中。如包存宽等<sup>[10]</sup>以中国能源战略为例,研究了SEA指标的类型、筛选过程和确定方法。有学者基于DSR模型建立了区域总体规划环境影响评价的层次性指标体系框架<sup>[11-12]</sup>。在海洋相关领域,黄翠等<sup>[13]</sup>设计了潮汐能和波浪能开发利用SEA的基本框架,之后又设计了海洋可再生能源的SEA指标体系<sup>[14]</sup>。岳保静等<sup>[15]</sup>通过采用DPSIR-TO-PSIS模型将陆地和海洋两大系统连接起来,综合体现二者相互制约、相互促进的整体关系,对陆海资源、海洋环境、社会经济系统进行综合评价,反映区域陆海资源环境承载力综合状况和时空变化趋势。

### 2.2 海上风电项目生命周期的环境影响

环境影响识别是环评指标体系构建的重要前置工作。根据已有研究,海上风电项目建设、运营、退役等各个阶段对海洋环境的主要影响可归纳如下。

建设期:风电场建设中各阶段产生的水下噪声均对海洋生物造成潜在影响,特别是施工期冲击式打桩噪声的影响,前期勘探阶段的钻探和地震勘探也会产生临时性噪声<sup>[16]</sup>。与深海采矿类似,风电场基础施工会影响海底沉积物的成分和粒径,可能改变地形地貌。此外,悬浮颗粒物可能导致底栖生物窒息或栖息地被破坏,影响生物的求偶、觅食和繁衍行为,降低生物繁殖率<sup>[17]</sup>。深远海生境恢复能力较弱,这类影响需要着重考虑。地基和冲刷防护装置的建设会导致底层(软底)栖息地的丧失,这类影响在单桩基础中最大,在漂浮式基础中较小<sup>[18]</sup>。风电基础结构像人工渔礁一样吸引鱼类,成为物种密集聚集区;另外,增加的船只活动和安装施工可能会导致海洋哺乳动物、海鸟和海龟回避风电场区域<sup>[19]</sup>。

运营期:张华等<sup>[20]</sup>认为,海上风电在运营初期对海洋生态系统的主要影响集中于水质、沉积物

质量、生物多样性和渔业资源等方面。风机运行产生的噪声可能对特定海洋生物和鸟类产生影响,风电场的运行可能造成鸟类栖息地变迁、繁殖和交流受阻以及种群结构改变等<sup>[19,21]</sup>。此外,船舶溢油有较大的环境风险,深远海由于海况和通达距离导致运维困难,也容易引发负面环境影响<sup>[4]</sup>。

退役期:海上风电项目拆除施工所产生的环境影响多类同于施工期。

近年来,海上风电与其他产业形成了融合发展的新模式,如海上风电与海洋牧场的融合。根据冯银银等<sup>[22]</sup>的研究可知,该模式并未显著改变海上风电的环境影响。

### 2.3 海上风电设备生命周期的环境影响

风力发电过程基本不会产生排放,但从全生命周期来看,成套的风电设备需要大量能源和资源投入,会不可避免地产生温室气体排放和其他有害物质排放,须纳入环境影响识别范围。深远海风电设备总体呈现出几个特点:叶片、机组、支撑结构大型化;采用漂浮式技术,柔直输电<sup>[23]</sup>。风电设备生命周期中造成的环境影响主要如下。

设备制造过程:海上风电设备制造过程中的能耗及温室气体排放,风电机组、塔筒和基础占比最高<sup>[24]</sup>;机组中叶片生产制造贡献了最大比例的全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)<sup>[25]</sup>;在全生命周期中,风机的生产过程所产生的温室气体排放占到总温室气体排放的40%以上;同时风机生产所排放的污染物对环境的负面影响最大,约占整个生命周期环境影响的50%以上<sup>[26]</sup>。为实现降本,漂浮式风机可能大批量采用钢混结构浮体,制造高强度混凝土将会导致生产过程中较高的温室气体排放。研究还发现,钢材参数的变化将对环境各项指标产生显著影响<sup>[23]</sup>。

设备运行阶段:漂浮式风电场对富营养化潜在影响贡献最大<sup>[27]</sup>;漂浮式风电的动态电缆有可能对海洋生物,尤其是大型哺乳动物、海龟造成

二次缠绕风险<sup>[28-29]</sup>;漂浮式风电对底质沉积物影响较小;柔直输电技术的电缆环境影响较小,但需要在海中建设单独换流站,可能增加环境负面影响。

设备退役阶段:在拆除海上风电设备时也会对海洋生物栖息地造成破坏,还可能导致噪声污染、水质恶化、沉积物扰动等。同时,基础的存在又会对渔业资源和海洋碳汇产生积极的影响<sup>[30]</sup>。叶片材料、叶片报废处置和海底电缆布局对海上风电场GWP有较大影响,材料资源消耗和淡水生态毒性是需优先关注的环境影响类别<sup>[31]</sup>。

### 3 海上风电战略环评指标体系建立方法

依据系统理论,本研究将风电开发视为复杂的工程—环境(海—陆—气)—经济—社会耦合系统,在系统分析海上风电相关法规、政策、规划的基础上,本文通过对海上风电开发利用可能产生的对海—陆耦合环境的影响进行识别,确定环评指标集,在满足科学性与完备性、独立性和代表性、可操作性、稳定性与动态性、政策相关性的原则下结合实际情况确定环评指标,具体流程如图1所示。本指标体系中环境影响的主要识别方法略述如下。

(1) 本文基于驱动力—状态—响应(DSR)框架提出的海上风电战略环评指标分为驱动力指标、状态指标和响应指标三类。

(2) 根据海上风电全生命周期(LCA)各阶段、各行为主体的环境行为和环境影响的特点,分别筛选各个阶段主要的环境影响因素,并进行分解。根据国家级战略环评的宏观定位,本文在应用LCA方法时,重点关注设备制造、退役回收等具有战略性资源/环境影响的阶段(产品生命周期),以及规划实施带来的长期累积效应;而施工期等微观、临时性的影响则简化处理,或将其归入项目环境影响评估(EIA)的衔接范畴。

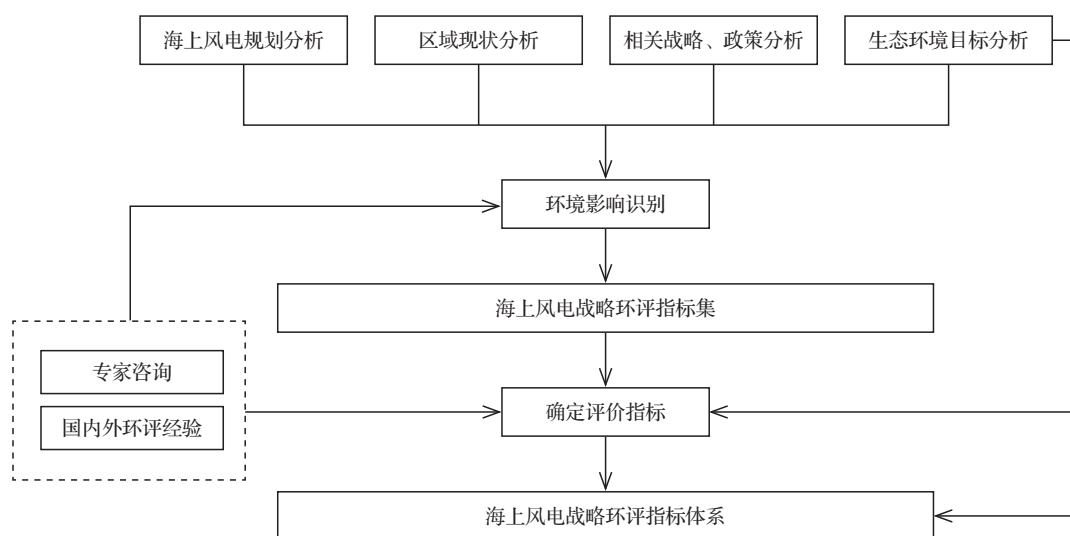


图 1 指标体系建立过程

Fig.1 Process of establishing the indicator system

#### 4 指标体系成果

本指标体系综合参考了现行海洋工程环评技术规范、国外海上风电环评指标体系<sup>[32-33]</sup>及相关研究成果、专家咨询意见,并依据 DSR 框架和 LCA 方法进行设计和构建。该体系系统考虑了陆海统筹原则与气候变化适应需求,力求全面覆盖海上风电项目与设备全生命周期环境影响,最终构建了一个包含目标层、准则层和指标层(区分规划环评与项目环评)的战略环评指标体系(表 1)。

(1) 目标层。目标层包括 7 个要素,即社会可持续发展、维持环境状况、维护生态安全、缓解气候变暖、资源与能源高效利用、环境管理、事故风险。

(2) 准则层。准则层指标用以全面反映对应目标层指标的特征,包含社会,经济,水环境,沉积物环境,水动力条件与地形地貌,生物质量,固体废物,大气环境,声环境,电磁环境,海洋生态,鸟类,海陆交互区域及陆域生态,岸线资源,海域、陆域空间资源,能源等子系统;各子系统可分

解为反映其特征的综合性指标。

(3) 指标层。指标的选择应满足生态环境管理目标,围绕环境影响的范围和特点,依据海上风电战略环评指标体系的建立原则进行筛选。指标层分为战略环评指标、项目环评指标—项目周期、项目环评指标—产品周期,并充分考虑连贯性和一致性。

2025 年发布的《环境影响评价技术导则 海洋生态环境》(HJ 1409—2025)主要针对项目环评,规范的是具体建设项目中海洋生态环境影响评价,导则中也明确规定“规划环境影响评价中的海洋生态环境影响评价参照本标准执行”(第 1 条)。因此,本指标体系中海洋生态部分遵循导则的核心原则和关注重点,但在指标的具体程度和选择上有所不同,更侧重宏观性、战略性和累积性影响。

本指标体系(表 1)的核心是列 a“战略环评指标”。列 b 和列 c 并非 SEA 的核心评估内容,而是用于衔接 SEA 与 EIA 的参考细分指标,体现了 SEA 对 EIA 的指导作用。

表 1 海上风电战略环评指标体系

Table 1 Strategic Environmental Assessment (SEA) indicator system for offshore wind power

目标	准则	指标			计算 / 评估方法
		a 战略环评指标	b 项目环评指标—项目周期	c 项目环评指标—产品周期	
社会可持续发展	社会	规划海上风电场年 / 日发电量			a. 根据规划总装机容量 (MW) 与年等效满负荷小时数 (h) 计算
		海上风电带动新增就业人口数			a. 通过产业链构成估算
	经济	地方 GDP 总量			a. 地方政府统计公报或统计年鉴
		地方海上风电产值			a. 根据规划发电量和上网电价估算
		海上风电产值占 GDP 的比例			a. 地方海上风电产值与地方 GDP 总量的百分比
		海上风电开发固投			a. 从项目可行性研究报告或地方政府重大项目投资计划中获取
维持环境状况	水环境	环境功能区水环境质量达标率	常规因子 (悬浮物)		a. 依据 HJ 442.3—2020 分等级进行估算, 达标面积占环境功能区总面积的百分比 b. 依据 HJ 1409—2025 第 7.1 节
			污水处理回用率	生活生产污水	
		废水		b. 依据 HJ 1409—2025 第 7.1 节	
	沉积物环境	环境功能区沉积物质量达标率	悬浮物		a. 参照 GB 18668—2002 分等级进行估算, 达标面积占环境功能区总面积的百分比 b. 依据 HJ 1409—2025 第 7.2 节
			废水		b. 依据 HJ 1409—2025 第 7.2 节
	水动力条件与地形地貌		潮流变化		b. 依据 GB/T 19485—2014 第 7.6 节
			海底地形地貌变化		c. 依据 GB/T 19485—2014 第 7.6 节
			海岸侵蚀淤积趋势		c. 依据 GB/T 19485—2014 第 7.6 节
	生物质量	环境功能区生物质量达标率	总汞、铜、铅、锌、铬、镉、砷、石油烃, 以及国家有特殊管控要求且易生物累积的有毒有害物质		a. 参照 GB 18421—2001 分等级, 达标面积占环境功能区总面积的百分比 b. 依据 HJ 1409—2025 附录 C
	固体废物	固体废物综合处置率	建筑垃圾、清淤过程污泥	一般生产废料	a. 得到妥善处置的固体废物总量与固体废物产生总量的比值 b/c. 依据 GB 18599—2020
			危险固废	依据 GB 18597—2023	
			含油锯末或棉纱	依据 GB 18597—2023	
			生活垃圾	估算施工和运维人员产生的生活垃圾量, 评估其分类、收集和转运至陆上环卫系统处理方案的可行性	

续表 1

目标	准则	指标			计算 / 评估方法
		a 战略环评指标	b 项目环评指标—项目周期	c 项目环评指标—产品周期	
维持环境状况	大气环境		TSP、PM <sub>10</sub> 、NO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 年 日平均浓度	GWP 温室效应度量	b. 估算施工船舶和陆上设施的源强, 采用大气扩散模型预测浓度, 对照 GB 3095—2026 评价 c. LCA 方法 (ISO 14040/44), 基于 LCA 数据库对设备制造阶段进行核算
				AP 酸化效应度量指标 (SO <sub>2</sub> )	同上
				EP 富营养化度量指标 (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	同上
				POCP (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	同上
	声环境		噪声	噪声	b. 依据 HJ 2.4—2021
	电磁环境		工频电磁场	工频电磁场	依据 HJ 24—2020
维护生态安全	海洋生态	自然保护地和生态保护红线 (主要保护对象数量和种群规模、主要生态功能、物种栖息地连通性)			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		重要湿地、特殊生境 (分布面积、物种种类、物种盖度、生物多样性、生境稳定性、生态健康情况)			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		珍稀濒危海洋生物及其生境 (种类、数量、种群规模、结构、分布、行为特征, 生境的面积、质量、连通性等)			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		重要水生生物 “三场一通道”			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		生物多样性指数、丰富度、均匀度			依据 HJ 1409—2025 第 6.4 节, 参照 HY/T 215—2017
		重要经济鱼种鱼卵仔鱼			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		浮游生物 (种类组成、生物量、密度 (丰度)、种群结构、群落特征、分布范围、物种多样性指数)			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		底栖生物优势种 (种类组成、生物量、密度 (丰度)、种群结构、群落特征、分布范围、物种多样性指数等)			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		海洋哺乳动物行为影响			参照 HJ 1409—2025 第 7.3 节
		初级生产力 (叶绿素 a 等)			依据 HJ 1409—2025 第 7.3 节, 参照 HY/T 215—2017、HJ 19—2022 分析评价

续表 1

目标	准则	指标			计算 / 评估方法
		a 战略环评指标	b 项目环评指标—项目周期	c 项目环评指标—产品周期	
维护生态安全	鸟类	重要栖息地被占用情况			依据 HJ 710.4—2014, 涉及鸟类重要栖息地面积与规划范围内重要栖息地总面积的比值
		主要迁徙路线被占用情况			依据 HJ 710.4—2014, 规划风电场占用鸟类迁徙路线的宽度和比例及廊道阻隔效应
		鸟类种类数变化率			依据 HJ 710.4—2014, 基准年或规划年鸟类调查物种数占基准值的比值
		鸟类行为影响			通过模型 (如 Band 模型) 估算碰撞风险, 通过现场观测评估规避行为等
海陆交互区域及陆域生态		海岸带植被面积、生物多样性		参照 HY/T 081—2005、HY/T 215—2017	
缓解气候变暖		温室气体减排目标完成情况	单位千瓦发电量碳排放	单位千瓦功率碳排放	a. 战略规划年减排量与年度减排目标比值 b. 项目全生命周期碳排放总量除以全生命周期总发电量 c. 风机全生命周期碳排放总量除以风机额定功率
资源与能源高效利用	岸线资源	自然岸线占比		规划占用自然岸线的长度与占用岸线总长度的比值	
		海域、陆域空间资源	单位装机容量用海面积		a. 规划面积或实际占用面积除以总装机容量 b. 风机机位包络面积总和
	风机机位占用海域		参考风机机位占用海域的计算方法		
	升压站占用海域		同上		
	海缆占用海底		同上		
	海缆登陆段占用土地		同上		
	陆上集控中心占用土地		同上		
	风电运维码头用地面积		依据项目设计文件		
能源	能源回收期 (EPT)		全生命周期总能耗除以年均发电量		
	风电场建设能耗	风电设备生产制造能耗	论文 [24]		
	风电场运营能耗	风电设备部件更换能耗 风电设备拆除回收节省能耗	论文 [31] 论文 [31]		
环境管理	环境质量管理体系建立与运行			采用核查表法, 对照 ISO 14001 等标准, 评估管理体系文件的完整性和运行记录的有效性	
	环保信息公布和监督机制			参照 HJ 130—2019 第 12 和 13 章评估	
	污染处理设备运行效率与效果			依据 HJ 1409—2025 第 9 章, 须满足 GB 3552—2018	
事故风险	溢油环境风险			依据 HJ 1409—2025 第 8 章	
	应急响应能力			依据 HJ 1409—2025 第 8 章	

本指标体系设计科学,融入了全生命周期评价思想,充分考虑了项目和产品两个维度,评估覆盖生产制造、建设、运营、退役等全过程,响应了海上风电深远海发展趋势下所凸显的环境影响,这比仅关注项目施工、运营、报废的现行规范指标体系更为科学、完整。体系中多为客观的定量指标,这些指标物理意义明确,并且表1详细列出了各指标标准化的选取或计算评估方法,符合科学性要求。

体系评价类别和指标的设置全面且合理,不仅满足了HJ 1409—2025的最新海洋生态环境评价要求,也覆盖了GB/T 19485—2014等现行规范所要求的海洋水文动力、海水水质、海洋沉积物、海洋生态、电磁辐射等全部环境要素,还纳入了“社会可持续发展”“缓解气候变暖”“资源与能源高效利用”等符合发展要求的新目标,这种综合性的考量在保持可行性的同时,也与国际先进实践保持一致<sup>[33]</sup>。

体系中大部分指标,其数据来源清晰,计算或评估方法标准、简明,有明确的规范依据。部分指标,如GWP、EPT等,虽然计算相对复杂,但可通过中国生命周期基础数据库(CLCD)等LCA专业数据库和规划参数进行模型估算,在战略决策阶段是可行的,并且这类指标在欧洲各国海上风电环评中已被普遍采用<sup>[32]</sup>。“珍稀濒危海洋生物及其生境”等指标的精确定量评估确实存在数据和模型上

的挑战。然而,新导则已将其列为评价因子,表明其重要性已获得官方认可,将其纳入SEA体系的目的并非要求立即精确定量,而是为了在战略层面“识别”出这些重大潜在影响,从而引导和推动后续的专题研究与监测投入,这正是SEA前瞻性作用的重要体现。

## 5 结语

本文在海上风电深远海发展的趋势下,遵循海上风电战略环评指标体系指导框架和流程,构建了海上风电战略环评指标体系,覆盖资源利用、生态保护、环境质量、气候适应性等重点领域。该指标体系不仅反映全生命周期海上风电对生态环境各方面的动态影响,还与区域规划、行业特性紧密结合,形成具有导向性与约束力的评估工具,既可以为深远海海上风电战略环评提供支撑,也可为我国提升海洋环境治理能力提供科学抓手。

深远海环境仍存在较多认知空白,因此该指标体系也应随科学认知的深化而进行动态完善。从长远看,本研究成果的应用有助于将环境保护要求内化到产业发展的决策前端,引导海上风电行业向技术更优、环境影响更小的方向创新,从而在保障国家能源安全、助力“双碳”目标实现的同时,促进海洋空间资源的科学有序利用,实现海洋经济高质量发展与高水平保护的协同并进。

## 参考文献 (References):

- [1] 胡德胜,孙睿恒,朱颖. 科技创新视域下中国推进深远海风电开发政策法律研究[J]. 资源科学, 2024, 46(7): 1421-1432.  
HU Desheng, SUN Ruiheng, ZHU Ying. A study on policies and laws for promoting China's deep-far offshore wind power from the perspective of scientific and technological innovation[J]. Resources Science, 2024, 46(7): 1421-1432.
- [2] 丁怡婷. 我国海上风电累计装机连续两年位居全球首位 海上风起绿电来[N]. 人民日报, 2023-08-10(10).  
DING Yiting. China's cumulative offshore wind power installations ranked first in the world for the second consecutive year, the wind is blowing off the sea and green electricity is coming[N]. People's Daily, 2023-08-10(10).
- [3] 董飞飞,陈海焱,张天龙,等. 深远海域海上风电发展分析与建议[J]. 中国工程咨询, 2024(2): 63-66.  
DONG Feifei, CHEN Haiyan, ZHANG Tianlong, et al. Analysis and recommendations for deep-sea and far-shore offshore wind power development[J]. China Engineering Consultants, 2024(2): 63-66.
- [4] 潘岳. 战略环境影响评价与可持续发展[J]. 环境保护, 2005(9): 10-14.  
PAN Yue. Strategic environmental impact appraisal and sustainable development[J]. Environmental Protection, 2005(9): 10-14.
- [5] United Nations. Agreement under the United Nations Convention on the law of the sea on the conservation and sustainable use of marine biological diversity of areas beyond national jurisdiction[EB/OL]. (2023-06-19)[2024-01-24]. <https://digitallibrary.un.org/record/4045982?v=pdf>.

- [ 6 ] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 海洋生态环境: HJ 1409—2025[ S ]. 北京: 中国标准出版社, 2025.  
Ministry of Ecology and Environment. Technical guidelines for environmental impact assessment: marine ecology and environment: HJ 1409—2025[ S ]. Beijing: Standards Press of China, 2025.
- [ 7 ] 国家能源局. 海上风电场工程规划环境影响评价报告编制导: NB/T 11725—2024[ S ]. 北京: 中国电力出版社, 2025.  
National Energy Administration. Guide for preparation of planning environmental impact assessment report for offshore wind power projects: NB/T 11725—2024[ S ]. Beijing: China Electric Power Press, 2025.
- [ 8 ] 王东升, 杜鹏飞, 任加国, 等. 战略环评对海洋可持续发展的重要性分析[ J ]. 海洋湖沼通报, 2010(3): 166-170.  
WANG Dongsheng, DU Pengfei, REN Jianguo, et al. The sustainable development calls for the strategic environmental assessment[ J ]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010(3): 166-170.
- [ 9 ] UNCSO. Indicators of sustainable development: framework and methodologies[ M ]. New York: United Nations, 1996.
- [ 10 ] 包存宽, 尚金城, 陆雍森. 战略环境评价指标体系建立及实证研究[ J ]. 上海环境科学, 2001, 20(3): 113-115.  
BAO Cunkuan, SHANG Jincheng, LU Yongsen. Study on establishment and verification of indicator system for strategic environmental assessment(SEA)[ J ]. Shanghai Environmental Sciences, 2001, 20(3): 113-115.
- [ 11 ] 刘琰萍. 战略环境评价指标体系研究与应用[ D ]. 天津: 天津大学, 2005.  
LIU Yanping. Research and application of strategic environmental assessment indicator system[ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [ 12 ] 赵文晋, 董德明, 龙振永, 等. 战略环境评价指标体系框架构建研究[ J ]. 地理科学, 2003, 23(6): 751-754.  
ZHAO Wenjin, DONG Deming, LONG Zhenyong, et al. Study on the framework of indicator system for strategic environmental assessment[ J ]. Geographical Science, 2003, 23(6): 751-754.
- [ 13 ] 黄翠, 李琦, 路亚娟, 等. 基于 DSR 模型的海洋可再生能源战略环境影响评价 (SEA) 指标体系研究[ J ]. 海洋技术学报, 2017, 36(4): 95-99.  
HUANG Cui, LI Qi, LU Yajuan, et al. Research on the index system of Strategic Environmental Assessment(SEA)on ocean renewable energy based on the DSR model[ J ]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(4): 95-99.
- [ 14 ] 黄翠, 李琦, 吴迪, 等. 实施潮汐能、波浪能战略环境影响评价 (SEA) 框架设计研究[ C ] // 第四届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛论文集. 2015: 408-412.  
HUANG Cui, LI Qi, WU Di, et al. Research on framework design for implementing Strategic Environmental Assessment(SEA)of tidal and wave energy[ C ] // Proceedings of the 4th China Marine Renewable Energy Development Annual Conference and Forum. 2015: 408-412.
- [ 15 ] 岳保静, 陈斌, 仇建东, 等. 基于陆海统筹的资源环境承载力评价方法探讨[ J ]. 海洋开发与管理, 2024, 41(3): 45-51.  
YUE Baojing, CHEN Bin, QIU Jiandong, et al. Discussion on evaluation method of resources and environmental carrying capacity based on sea-land coordination[ J ]. Ocean Development and Management, 2024, 41(3): 45-51.
- [ 16 ] 陶毅, 王强, 许肖梅. 海洋风电场水下噪声评估与管理研究[ J ]. 环境监测管理和技术, 2021, 33(2): 1-4.  
TAO Yi, WANG Qiang, XU Xiaomei. Study on underwater noise assessment and management of offshore wind farms[ J ]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, 33(2): 1-4.
- [ 17 ] 王翠, 丁一, 罗阳, 等. 深海采矿沉积物羽流环境影响研究现状与展望[ J ]. 应用海洋学学报, 2024, 43(3): 473-484.  
WANG Cui, DING Yi, LUO Yang, et al. Status and perspectives of environmental impact studies on deep-sea mining sediment plumes[ J ]. Journal of Applied Oceanography, 2024, 43(3): 473-484.
- [ 18 ] ICF. Comparison of environmental effects from different offshore wind turbine foundations[ R ]. Sterling, VA: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, 2020.
- [ 19 ] 苏文, 吴霓, 章柳立, 等. 海上风电工程对海洋生物影响的研究进展[ J ]. 海洋通报, 2020, 39(3): 291-299.  
SU Wen, WU Ni, ZHANG Liuli, et al. A review of research on the effect of offshore wind power project on marine organisms[ J ]. Marine Science Bulletin, 2020, 39(3): 291-299.
- [ 20 ] 张华, 吴佳辰, 何平. 海上风电工程运营初期海洋环境影响初步研究: 以福清兴化湾海上风电场一期 ( 样机试验风场 ) 项目为例[ J ]. 渔业研究, 2020, 42(3): 223-233.  
ZHANG Hua, WU Jiachen, HE Ping. Primary research on the impacts of marine environment ecology from the offshore wind farm operation: a case study of the experimental offshore wind farm in Fuqing Xinghua Bay[ J ]. Journal of Fisheries Research, 2020,

- 42(3): 223-233.
- [21] 朱永可, 李阳端, 楼瑛强, 等. 风力发电对鸟类的影响以及应对措施[J]. 动物学杂志, 2016, 51(4): 682-691.  
ZHU Yongke, LI Yangduan, LOU Yingqiang, et al. Impact of wind farm on birds and the mitigation strategies[J]. Chinese Journal of Zoology, 2016, 51(4): 682-691.
- [22] 冯银银, 周全利, 刘元进, 等. 海洋牧场与海上风电融合发展项目对海洋环境的若干影响分析[J]. 环境保护科学, 2023, 49(1): 69-74.  
FENG Yinyin, ZHOU Quanli, LIU Yuanjin, et al. Impact of marine ranching and offshore wind power industrial convergence projects on marine environment[J]. Environmental Protection Science, 2023, 49(1): 69-74.
- [23] 李达, 孙涛, 易丛, 等. 深远海浮式风电技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 108-122.  
LI Da, SUN Tao, YI Cong, et al. Development of deep-sea floating wind power technology[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 108-122.
- [24] 杨举华, 张力小, 王长波, 等. 基于混合生命周期分析的我国海上风电场能耗及温室气体排放研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 786-792.  
YANG Juhua, ZHANG Lixiao, WANG Changbo, et al. Energy consumption and greenhouse gas emission of an offshore wind farm in China: a hybrid life cycle assessment perspective[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(2): 786-792.
- [25] 蔡晓萍, 段华波, 马艺, 等. 基于生命周期分析的风机叶片环境影响评价[J]. 深圳大学学报(理工版), 2023, 40(1): 40-47.  
CAI Xiaoping, DUAN Huabo, MA Yi, et al. Environmental impact assessment of wind turbine blades analysis based on life cycle [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(1): 40-47.
- [26] 向宁, 王礼茂, 屈秋实, 等. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 745-755.  
XIANG Ning, WANG Limao, QU Qiushi, et al. Comparison of emissions from offshore and onshore wind power systems based on life cycle assessment[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 745-755.
- [27] YUAN W Y, FENG J C, ZHANG S, et al. Floating wind power in deep-sea area: life cycle assessment of environmental impacts[J]. Advances in Applied Energy, 2023(9): 100122.
- [28] COPPING A E, HEMERY L G. U.S. Offshore wind synthesis of environmental effects research[R]. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2020.
- [29] HARNOIS V, SMITH H C, BENJAMINS S, et al. Assessment of entanglement risk to marine megafauna due to offshore renewable energy mooring systems[J]. Progress in Oceanography, 2015, 137: 27-49.
- [30] HALL R, JOÃO E, KNAPP C W. Environmental impacts of decommissioning: onshore versus offshore wind farms[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2020, 83: 106404.
- [31] CAO Y, MENG Y, ZHANG Z, et al. Life cycle environmental analysis of offshore wind power: a case study of the large-scale offshore wind farm in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 196: 114351.
- [32] Pondera Consult. Comparison of North Sea EIAs and SEAs of maritime spatial plans and wind energy developments: an analysis of similarities and differences between North Sea countries in benefit of the SEANSE-Project[R]. 2019.
- [33] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. UK offshore energy strategic environmental assessment[R]. 2021.