引用格式：刘俊义, 刘雄飞, 王宗继, 等. 数字地球技术在海洋环境保障中的创新应用与发展路径. 中国科学院院刊, 2026, 41(1): 130-141, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251211003.
Liu J Y, Liu X F, Wang Z J, et al. Innovative applications and development paths of Digital Earth technology in marine environmental support. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(1): 130-141, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251211003. (in Chinese)

数字地球技术在海洋环境保障中的创新应用与发展路径

刘俊义* 刘雄飞 王宗继 曾志鸿 谢辉平 刘思叶

中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094

摘要 数字地球技术与海洋环境保障领域的交叉融合是全球科技发展的重要趋势。针对海洋环境数据稀疏、动力复杂及多尺度关联等特点，结合国际数字地球技术演进与我国自主创新实践，文章从方法论层面构建三大核心范式：（1）要素整合本体论，提出“时空嵌入场+本体”混合体表征范式，实现海洋物理环境与地质、生物、化学等多要素的一体化集成与动态演化；（2）循环嵌套时空律，提出“多周期时间分解-跨尺度结构转换”时空骨架，为复杂海洋现象提供物理可解释、不确定性可量化的预测推演框架；（3）信息跃迁增值法，提出“结构-语义-效用”信息跃迁机制，实现从海量原始数据到高价值决策知识的转化与增值。基于上述研究，文章从国家级基础设施布局、数据融合建设模式、行业应用增值渠道3个维度，提出针对性政策建议，为我国自主可控的海洋数字地球技术体系建设与产业应用提供支撑。

关键词 数字地球，海洋环境保障，交叉融合，政策建议

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20251211003

CSTR 32128.14.CASbulletin.20251211003

数字地球是地球系统科学与信息科学深度融合的产物，在需求与技术的双重驱动下，其概念内涵和技术体系一直处于螺旋上升的演进过程中[1]。数字地球既是地球的时空基准框架，也是时空数据承载设施，还是多维可视化平台，更是数字孪生系统和智能生态系统，是人类认识地球、预测地球、调控地球的行星级基础设施[2]。海洋是地球的重要组成部分，是由底部、水体、水汽界面、生物和人文等五大要素共同构

*通信作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA0370603）
修改稿收到日期：2026年1月4日

成的跨尺度、跨介质、跨学科的复杂巨系统[3]。依托数字地球对海洋环境进行表征、计算、决策和保障具有天然优势。数字地球所具有的要素整合本体论、循环嵌套时空律、信息跃迁增值法，能够为海洋环境保障注入顶层智慧；海洋环境所具有的数据稀疏化、动力复杂化、关联尺度化等学科特点[4]，又为数字地球提出新的需求并融入新的技术特征。本文结合数字地球发展技术脉络与我国数字地球自主研发实践，提出海洋环境保障技术创新的启示与方向，同时给出相关政策建议。

1 数字地球发展历程

1998年，美国前副总统戈尔首次提出“数字地球”的概念（图1），旨在通过信息技术构建地球的数字镜像[5]。2005年，美国谷歌公司收购美国Keyhole公司推出Google Earth[6]，为社会大众提供了“鸟瞰地球”的三维可视化交互平台（图2）。由于其全球视野、时空一体、数据整合、简便实用、开放共享等特点，迅速风靡全球并持续至今。2010年，谷歌公司又推出Google Earth Engine（GEE）云端遥感大数据平台①并开放使用，推动数字地球快速进入千行百业，让地球信息真正成为公共知识。2014年，谷歌公司收购英国DeepMind公司发展智能数字地球技术。2023年，谷歌公司推出基于图神经网络的全球中期天气预报模型GraphCast[7]，基于近40年的再分析天气数据，利用图神经网络（GNN）实现小时级、公里级高精度天气预报；2024年，引入神经辐射场技术[8]实现基于轻量化特征数据的高逼真渲染；2025年，又推出AlphaEarth Foundations（AEF）虚拟卫星模型[9]，通过时空精度编码器（STP），将海量历史多源异构遥感数据“浓缩”为10米×10米网格嵌入向量，能够构造生成不同季节和传感器条件下的地表图像，构造了“行星尺度的AI”，走向用智能解决全球难题的历史新阶段；同时又计划将AEF嵌入Gemini多模态大模型[10]，构建形成地理空间推理智能体，推出自然语言驱动的“空间问答”与智能决策服务，有效弥合原始数据与综合认知间的鸿沟。谷歌公司在海洋领域也持续发力，其Google Earth平台已提供全球500米级高逼真海底数据集（GEBCO_2025 Grid数据集）、全球人类海洋活动地图等要素，2025年在AlphaEarth虚拟卫星模型中发布海洋嵌入层，在沿岸50千米宽的网格中，逐日生成海面温度、水色、波浪、船舶存在概率、漂浮物指数等5个嵌入向量，实现零样本分类、实时搜索、7天预测等功能，成为首个全球开放、可计算、可扩展的海洋数字孪生底座。上述智能技术正在引领数字地球走向“无尽前沿”。

我国在数字地球领域的研究与应用起步早、进展快，中国科学院作为核心力量，始终引领国内数字地球技术发展。2003年，中国科学院发布《数字地球基础理论研究报告》[2]，奠定我国数字地球发展的理论基础；随后，我国在数字地球核心技术研发、基础设施建设、行业应用推广等方面取得一系列突破性成果，构建了自主可控的遥感卫星数据获取体系，研发了多源数据融合处理平台，在海洋环境监测、灾害应急响应、资源勘探等领域形成特色应用。2018年，中国科学院立项“地球大数据科学工程”战略性先导科技专项，构建了地球大数据云服务平台，成为全球首个以大数据服务联合国可持续发展目标（SDGs）的宏大科学工程[11]。国际数字地球学会（ISDE）自成立以来，我国科学家积极参与学术治理与标准制定。2024年国际数字地球学会成立20周年之际，我国提出数字地球未来发展的中国方案[1]，推动全球数字地球技术

① Moore R T, Hansen M C. Google Earth Engine: A new cloud-computing platform for global-scale Earth observation data and analysis. (2011-12-01) [2026-01-10]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=0bc3cc596bb79f91b16ac8fafbb761dd&site=xueshu_se&hitarticle=1.

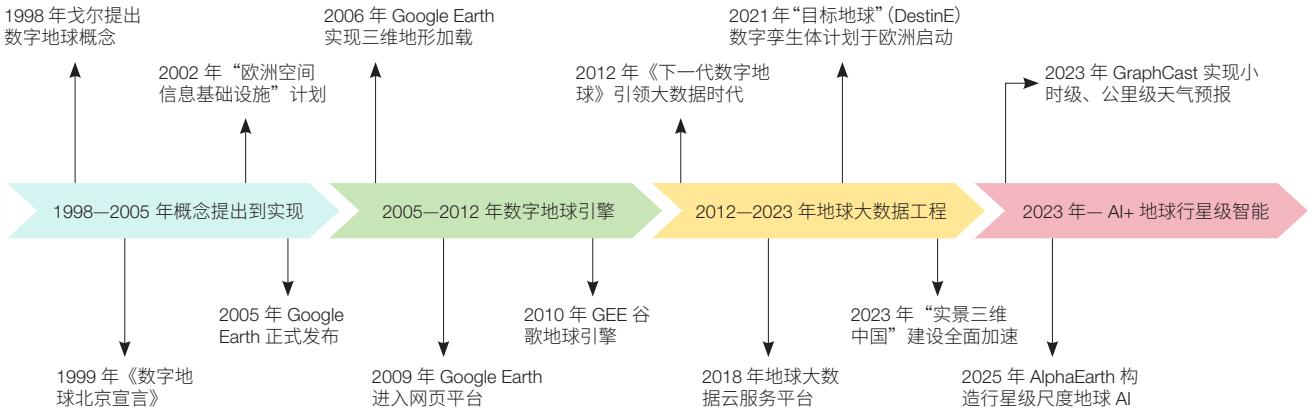


图 1　数字地球发展沿革

Figure 1　Historical development of Digital Earth

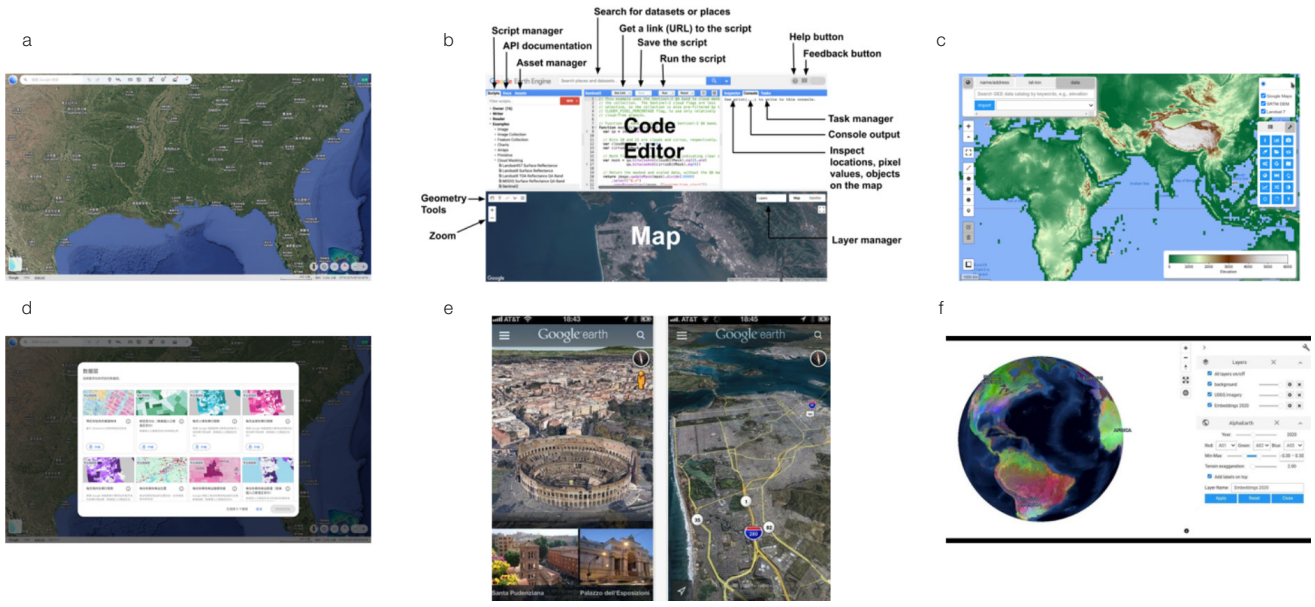


图 2　谷歌地球引擎系统的情况

Figure 2　Cases of Google Earth Engine (GEE) system

（a）基础界面（截图自 https://earth.google.com）；（b）引擎开发编辑器（截图自 https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground）；（c）可编辑的组件布局（截图自 https://google-earth-engine.com/Advanced-Topics/Sharing-Work-in-Earth-Engine-Basic-UI-and-Apps）；（d）全球数据服务（截图自 https://earth.google.com）；（e）边端展示（截图自 https://www.cultofmac.com/news/google-earth-for-ios-updated-with-street-view-and-improved-interface）；（f）Alpha Earth 智能交互（截图自 https://www.youtube.com/watch? v=EGL7fXyA7-U）

(a) Basic Interface (Image source: https://earth.google.com); (b) Code Editor (Image source: https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground); (c) Editable UI Layout (Image source: https://google-earth-engine.com/Advanced-Topics/Sharing-Work-in-Earth-Engine-Basic-UI-and-Apps); (d) Global Data Service (Image source: https://earth.google.com); (e) End Service (Image source: https://www. cultofmac. com/news/google-earth-for-ios-updated-with-street-view-and-improved-interface); (f) Alpha Earth Interaction (Image source: https://www.youtube.com/watch?v=EGL7fXyA7-U)

共建共享。当前，我国数字地球技术已形成“自主研发+开放合作”的发展格局，在海洋数字孪生、智能预测推演等领域的技术水平逐步跻身国际先进行列。

2 海洋数字地球创新发展的核心范式

探究数字地球的底层机理，结合海洋环境保障的专业特色，从要素整合本体论、循环嵌套时空律、信息跃迁增值法3个维度，构建海洋数字地球创新发展的核心范式，形成对海洋环境领域发展的启示，为海洋环境保障提供方法论支撑。

2.1 要素整合本体论：“时空嵌入场+本体”混合体表征范式

数字地球通过融合不同领域、不同来源的离散要素，构建结构化知识体系以支撑各种应用，从方法论的角度可归纳为要素整合本体论。要素整合本体论的核心要义是，面向复杂系统的要素关联性与结构涌现性特点，通过“表征、关联、融合”三重构造方法，将离散的部分动态重组为有机的整体，通过微观互动来触发宏观的质变，揭示地球现象的内在机理，支撑高层级分析应用。

在要素整合本体论的指导下，综合考虑海洋环境保障领域中要素异构化、数据网格化、现象多样化、应用多元化等特点，针对现有海洋环境要素表征方式中存在的多源数据融合难、要素状态动态更新弱、场与本体耦合不深、应用场景适配性不足等短板，本研究创新性提出“时空嵌入场+本体”混合体表征新范式（图3），具体技术途径包括以下4种。

（1）向量嵌入网格：构建全域海洋连续时空场表征体系。借鉴谷歌AEF[9]向量嵌入网格技术方法，依托智能编码器的特征提取与融合能力，对海洋环境领域的多尺度、多时相、多传感器观测数据、多物理量实测数据、多模式仿真计算格点数据开展一体化整合与特征浓缩，最终构建覆盖全球海洋的连续时空场网格向量库。该向量库具备跨传感器、跨时相、跨模式的统一表征能力，在完整保留海洋时空场核心特征的前提下，实现数据存储量与计算复杂度的双重降维，为全域海洋时空场的高效调用与分析奠定了数据基底。

（2）动态本体建模：实现海洋现象与对象的可计算化表征。借鉴Palantir[12]的动态本体技术，针对中尺度涡、内孤立波、裂流等海洋变化现象，以及海上风车、珊瑚礁、船舶、海底地形、深海生物群落等对象，按照语义层-动能层-动态层的划分，基于物理、地质、化学、生态等学科的知识工程，建立动态本体的多维度属性，及其过程函数、规则函数、活动函数和优化函数，使其能够在传感器数据驱动下动态更新

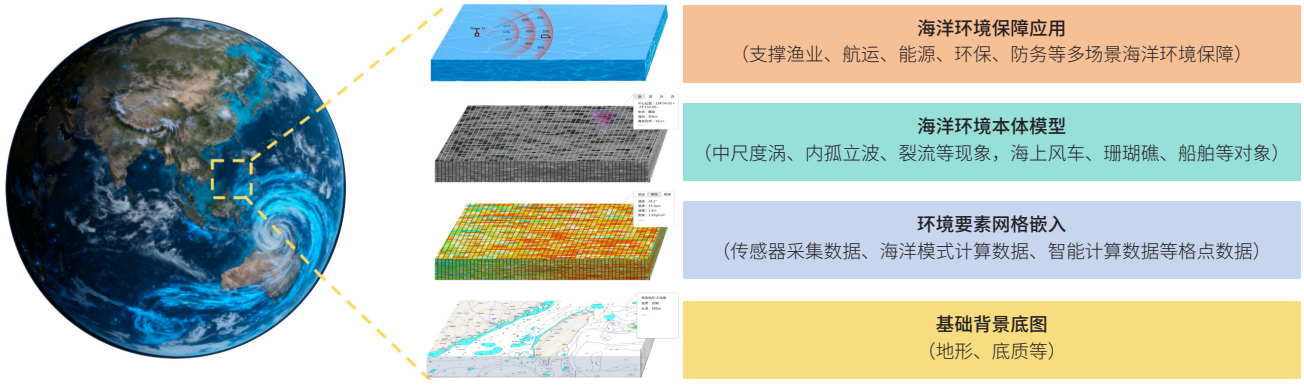


图3　基于海洋环境保障的“时空嵌入场+本体”范式

Figure 3　Spatio-temporal embedded field + ontology paradigm based on marine environmental support

状态，让要素本体动起来、活起来，从而具备可设计、可计算、可演化的优势，实现从静态要素描述到动态过程表征的技术升级。

（3）双向索引构建：达成时空场与本体的深度耦合联动。基于统一的时空编码规则，搭建时空嵌入场与海洋要素本体之间的双向索引机制，实现场体耦合的双向映射与互馈分析。① 将各类海洋要素本体精准锚定至全域海洋连续时空场的对应位置，实现对本体空间运动、状态变化的实时追踪与可视化呈现。② 捕捉要素本体在时空场中产生的扰动特征，量化分析本体对周边海洋时空场的影响规律；同时反演时空场的环境变化对要素本体状态演化的作用模式，完整刻画场与本体之间的双向作用机理。

（4）异构超图[13]构造：完成从要素表征到应用落地的范式闭环。面向海洋捕捞、台风路径规避、海上溢油漂移预警、应急疏散调度、海洋资源勘探、海洋生态保护等多元化业务应用场景，依据各场景的核心业务逻辑关系，将场景内关联的海洋要素动态本体进行网络化连接，构建异构超图知识表征模型。其中，异构超图的节点为各类海洋现象与对象的动态本体，超图的边则定义为节点间的时空关联、因果驱动、物理作用、演化传导等异构关系，该异构超图既是对应应用场景的核心知识表征载体，也是适配场景需求的应用级动态本体。依托图神经网络（GNN）的信息传递与聚合运行机制，实现超图内要素本体的动态联动：当超图中任一节点的状态发生变化时，其影响信息将向邻接节点实时传递；各节点完成邻接信息聚合后，实现自身状态的迭代更新。基于该机制，超图内将开展大规模的本体—本体、本体—环境耦合计算，形成数据—模型的正反馈闭环与行动—环境的负反馈闭环；当超图内的信息交互密度突破临界阈值时，微观层面各要素本体的局部优化行为，将自发涌现为宏观层面应用场景整体效能的阶跃式提升，实现从要素表征到场景决策的智能化跃迁。

综上，“时空嵌入场+本体”混合体表征范式，可有效实现海洋物理环境、地质地貌、生物群落、化学特征等多源异构要素的一体化整合与统一表征，从技术层面破解海洋环境多要素表征割裂、耦合不足、动态缺失、适配低效的核心难题，为海洋环境保障领域的各类应用，搭建起统一、规范、高效的要素表达框架，同时为数字海洋建设提供了可落地的本体论方法论支撑。

2.2 循环嵌套时空律：“多周期时间分解-跨尺度结构转换”时空骨架范式

循环嵌套时空律是地球系统演化的底层时空法则，其理论根源可追溯至自然哲学中的周期律、尺度理论与系统层级思想。其核心特征表现为双重维度的有序性：时间维度上，地球系统现象的演化受分秒至年月等多重周期叠加驱动；空间维度上，呈现跨尺度自相似、层级嵌套及能量串级的结构特点。该规律打破了对地球复杂现象的混沌认知，揭示其有序演化本质，为地球系统多尺度表征与演化建模提供关键理论支撑。

当前，数字地球已将该规律初步应用于陆地植被绿度、地表温度、干旱指数、土地利用等现象的预测推演分析（图4）[9]。立足海洋环境现象跨尺度、远距离、长周期耦合关联的特性，在循环嵌套时空律的指导下，可通过“多周期时间结构→可计算时间函数”和“多尺度空间结构→可递归空间算子”的转换实现核心突破——小尺度时空现象通过物质交换、能量传递，以及信息反馈影响大尺度系统的稳定性与演化进程，大尺度时空现象则通过边界约束、资源供给调控小尺度现象的发展强度（表1）。这一逻辑可为数字地球内核植入具备自相似、可插值、可预测特性的“时空骨架”，赋予其解读地球任意现象“预测—回归—推演”的统一时空语法，形成“多周期时间分解-跨尺度结构转换”时空骨架新范式，核心技术途径有如下3种。

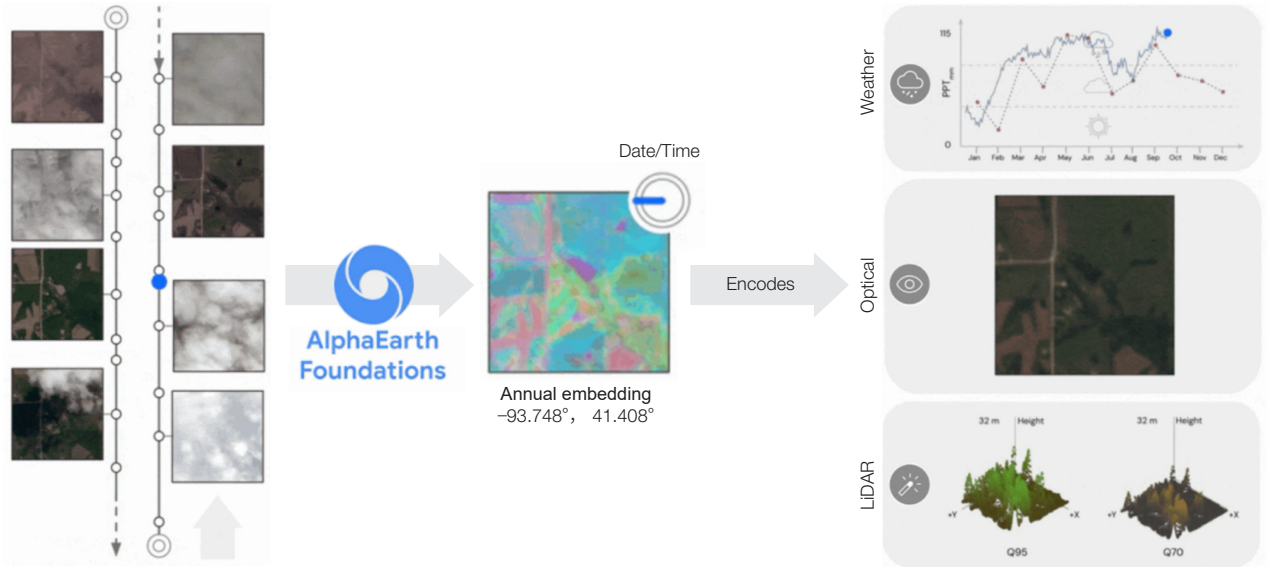


图 4　Alpha Earth 基础模型中的时空现象规律可视化

Figure 4　Spatio-temporal regularity phenomenon visualization in Alpha Earth Foundation

图片来源参考文献[9]及 https://deepmind.google/blog/alphaearth-foundations-helps-map-our-planet-in-unprecedented-detail

Image source:　Reference [9], and https://deepmind.google/blog/alphaearth-foundations-helps-map-our-planet-in-unprecedented-detail

表 1　不同时空尺度海洋环境典型现象

Table 1　Classic marine environmental phenomenon of different spatio-temporal scales

时空尺度	典型现象
全球尺度(全球、年)	全球大洋环流、海岸侵蚀、厄尔尼诺-南方涛动等
大尺度(千公里级、月)	西风带波动、海冰变化、温跃层、风暴潮等
中尺度(公里级、天)	潮汐、中尺度涡、内孤立波、温盐密等
小尺度(米级、分钟-秒级)	潮流、拍岸浪、裂流等

（1）时间维周期分解。对海面高度、温度等海洋时空变量序列，采用傅里叶-趋势分解方法，分离出代表日、季、年等不同循环周期的恒定谐波系数，及表征长期变化的慢变趋势项，构建连续时间函数以捕捉数据的周期演化规律（图 5a）。例如，对吕宋海峡至西沙海域 30 年逐日内潮-内波 SSH 异常序列进行傅里叶-趋势分解，提取 M2、K1 半日/全日潮波及 90 天季节内振荡信号，获取连续谐波系数，精准挖掘其时间周期规律。

（2）空间维级联分析。对海洋现象空间场实施多级空间平均，得到表征大尺度背景的“母场”；通过原场与母场的差值提取中尺度“残差”，再通过残差局部方差计算获得小尺度“涨落”，最终形成“母场-残差-涨落”的能量串级结构，实现不同空间尺度信息与能量的清晰分离（图 5b）。该结构在物理意义上契合海洋动力学能量串级理论，使跨尺度能量分布与传递可计算、可分析，为解析海洋环境现象机理提供理想数学框架。例如，对吕宋海峡至西沙区域的空间级联分析，可得到 1 000 千米尺度母场及海峡-盆地密度锋面背景，通过差值运算获得 50 千米波包残差，通过 3 千米方差分析得到孤立子涨落，完整构建能量串级体系。

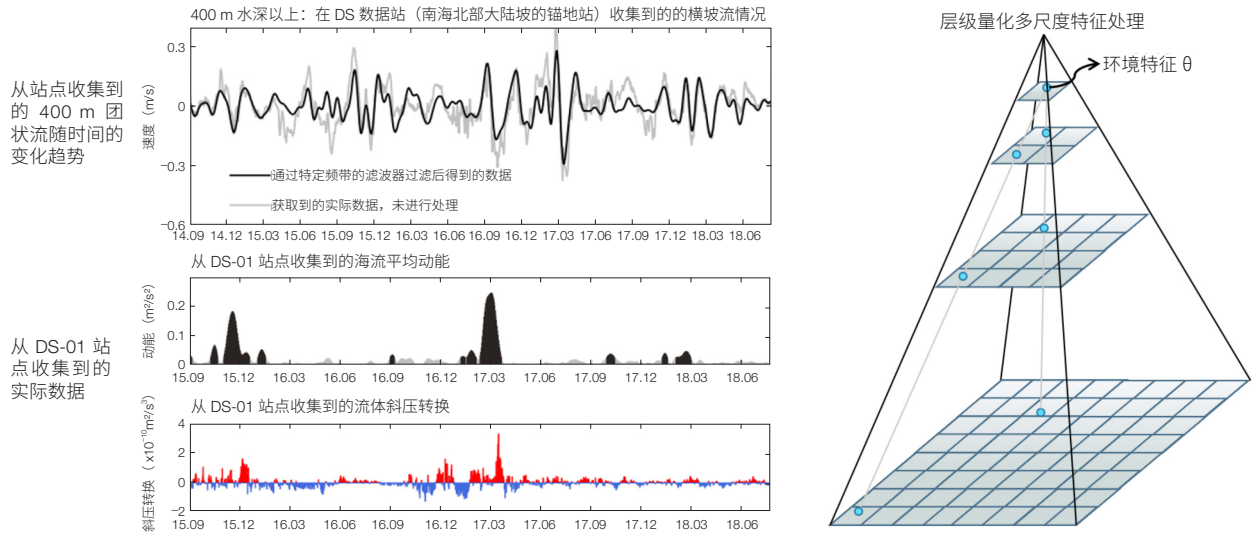


图 5　海洋环境时间和空间的循环嵌套机制[14,15]

Figure 5　Cyclic nested mechanisms of marine environment time and space[14,15]

（a）海洋环境时间维周期分解示意图；（b）海洋环境空间维级联分析示意图

(a) Schematic diagram of temporal and spatial decomposition of the marine environment; (b) Schematic diagram of hierarchical cascade analysis of marine environmental space

（3）时空算子构造。基于循环嵌套时空律，将海洋现象抽象为时空维度的特征组件，将对现象的分析操作转化为对特征组件数学函数的运算，构建可计算的动力-统计混合模型引擎，实现从“状态模拟”向“过程模拟”的升级。该引擎可将构成海洋复杂现象的静态组件重组为动态演化系统，且依托明确的物理意义具备强可解释性，实现从数据查询到未来现象预测推演的全流程覆盖。以南海超强内波为例，通过傅里叶-趋势分解提取潮汐与季节振荡特征，结合嵌套空间律构建海峡-盆地尺度能量级串，建立可微分谱-马尔可夫模型，可实现内波到达时间的精准预测；该范式对海底滑坡等深海地质灾害、海洋化学物质扩散等现象同样适用，可有效挖掘时空演化规律，为风险预警提供技术支撑。

在技术发展层面，可引入智能技术强化循环嵌套时空律的应用效能：采用Transformer模型捕捉突变周期，通过超分辨率/语义分割联合模型实现地形边界自适应[16]；利用图神经网络完成跨尺度残差传播，构建可微分动力-统计混合引擎；通过反向传播优化母场-残差-涨落平衡，最终实现具备物理可解释性、边界自适应能力与不确定量化功能的智能时空推演。

2.3 信息跃迁增值法：“结构-语义-效用”信息跃迁机制

信息跃迁增值法的核心观点是：信息价值并非固有不变，也非线性累积，其价值高低与信息数量无必然关联。通过系统性的结构转化与语义注入，可推动信息从“事实性描述”非线性跃变为“行动性指引”。这一过程本质上遵循数据—信息—知识—智慧（DIKW）模型[17]的层级递进规律，体现信息跃迁的涌现性特质。该方法的理论根源可追溯至信息哲学与认知科学，尤其聚焦知识本体论与价值论领域。从认知逻辑来看，人类认知深化的核心路径是“原始信号结构化形成有序信息—信息语义化赋予知识理解—知识场景化实现决策升华”，而信息价值的指数级增长，正是依托“结构-语义-效用”三位一体的连续跃迁链条实现的。

数字地球“态势一张图”[18,19]是高能级信息的典型表征载体，其核心逻辑是将行业应用场景相关信息，通过简洁符号、明确属性、连续轨迹、实时影响等方式可视化呈现，助力用户实时掌握态势、预判变化、精准决策、指导行动。其信息增值过程完全契合“结构-语义-效用”3次跃迁规律，核心跃迁链为“传感器格网→动态本体→异构超图→活动影响决策”：数据体积从千兆字节量级缩至千字节量级，信息密度却提升万倍，同时具备强结构化、低延迟、易解读的优势，可实现分布式节点秒级认知拉齐。其核心技术途径具体有如下3种。

（1）数据结构跃迁。采用“时空嵌入场”技术，对多源传感器数据进行统一浓缩表征与结构优化，有效解决观测数据空间稀疏、时间离散、体积庞大、信息密度低等痛点，实现数据高效存储与快速计算。以海上风电运维应用为例（图6），通过整合卫星、测风塔、海流浮标、船舶自动识别系统（AIS）、海底观测站等多源数据，构建融合“风-浪-流-船-地质-生物-化学”的网格嵌入向量数据集，为后续智能分析提供高质量数据基础。

（2）本体语义跃迁。借助智能算法从观测数据中识别关键要素，先对要素实施多周期时间分解与跨尺度结构转换，基于时空特性组件构建语义表征并完成演化预测；再结合要素属性数据，遵循循环嵌套时空律激活本体的时空行为，将静态切片信息升级为可运动、可决策、可行动的目标活动信息，实现传感数据向本体行为语义的跃迁，同时进一步压缩数据量、提升信息密度。例如，在海上风电运维场景中（图6），通过智能识别风速、浪高、浪向等核心要素，结合时空律预判其变化趋势，激活海上风电动态本体，关联风机叶片转动、运维船顶靠、爬梯晃动等行为与规则函数，将原始传感数据转化为“运维船可否出海维修”的活动级信息。

（3）场景效用跃迁。传感器数据驱动动态本体状态变化后，动态本体会将该变化输入场景异构超图，向邻接本体传递信息、扩散影响，通过一次迭代完成多跳因果推理；超图内各本体通过群体协同形成场景层级的高层信息，同时实现个体信息的协同增强；最终结合场景业务逻辑开展仿真推演，输出行动时空窗口、力量配置、风险评估等核心决策信息，主动应对未来不确定性，完成面向应用场景的信息效用跃迁。仍以海上风电运维为例（图6），基于风机、备件仓、运维船、船员、电价、罚款规则等要素本体构建的异构超图，可将运维活动信息升级为发电损失、船员安全、航路选择等损失评估信息；通过推演超图可能路径，进一步将损失评估信息转化为出动时间窗口、航路空间窗口、力量派单方案及收益风险评估的行动决策信息。

综上，“结构-语义-效用”3级信息跃迁，可实现从低信息密度传感器数据到高价值决策信息的根本性转变。例如，从海上风电设备观测数据转化为台风季抢修窗口决策信息，这正是数字地球“态势一张图”的核心精义。通过信息跃迁增值法构建的跃迁范式，能将原始低价值密度观测数据，转化为可直接支撑行业决策的“态势一张图”知识产品。在此过程中，信息增值被建模为清晰的价值流管道，每个节点通过特定结构化与关联机制注入新意义、新关系，实现信息在形式（结构化）、内涵（语义化）、目的（效用化）3个维度的质变，最终产出高度凝练的决策指令（如时间窗口、力量配置），彻底完成从“数据负担”到“决策资产”的跨越。

3 海洋环境保障导向的政策建议

深刻感悟数字地球建设的要素集成本体论、循环嵌套时空律和信息跃迁增值法的内涵机理，本研究提出基于数字地球发展海洋环境保障的“时空嵌入场+本体”混合体表征、“多周期时间分解-跨尺度结构转换”时空骨架、“结构-语义-效用”信息跃迁等方法论

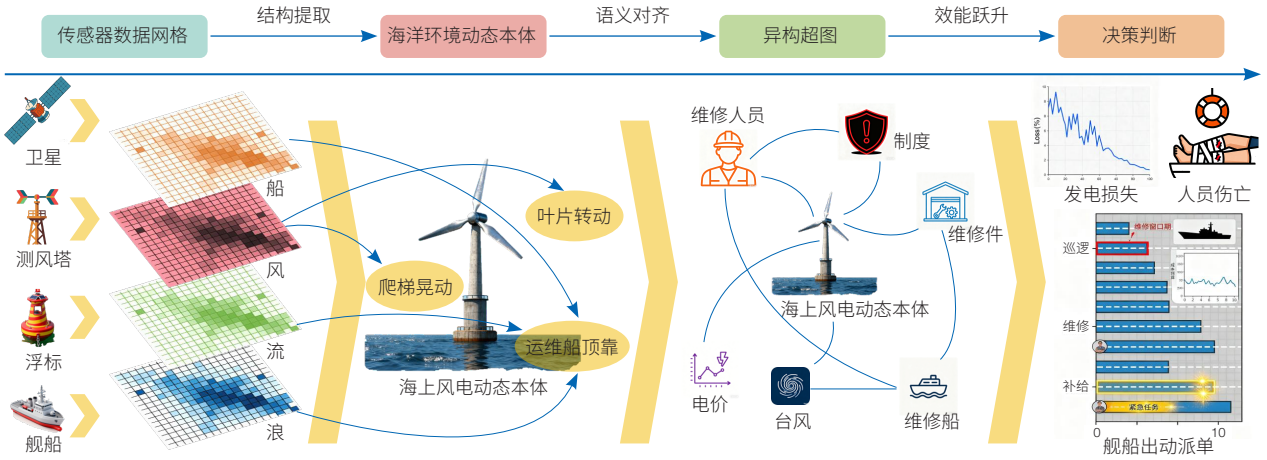


图6　海上风电“态势一张图”编排效果示意图

Figure 6　Schematic diagram of offshore wind power “Operational Picture” layout effects

层面的发展启示，共同构成发展的新范式。要促进上述范式的落地和见效，需要政策和管理方面的支持，具体有以下3点。

3.1 明确海洋数字地球的国家级基础设施定位

将海洋数字地球纳入国家战略智能信息基础设施体系，聚焦海洋多要素监测、跨尺度预测、智能决策等核心需求，整合空天信息、海洋环境、地球科学、信息科学、行业应用等领域资源，加强原始技术创新，防范脱钩断链博弈风险。重点支持深海海底智能信息基础设施建设，构建覆盖近海—远海—深海的立体观测网络，布局海底观测站、智能浮标、无人船、遥感卫星等观测设备，建立统一的海洋数据标准与共享机制。依托中国科学院等科研机构的技术积累，打造自主可控的海洋数字孪生底座，常态化支撑海洋环境监测、灾害预警、资源勘探、生态保护、航运安全等多领域应用，提升我国在全球海洋治理中的话语权。

3.2 创新海洋数据融合建设模式

针对海洋数据碎片化、多源异构的问题，推广数据网格（data grid）架构，构建“数据供给—消费—增值”的良性循环体系，让每个数据单元既是供给者也是消费者。并在统一的海洋数字孪生底座的支撑下，建立数据股权绑定机制，通过区块链技术实现数据价值追溯与结算，推动数据拥有者从“卖原始数据”，向“持数据股、分红增值”转型。面向海洋数据的提供方，设立海洋数据融合专项基金，支持多源数据整合与联邦计算、动态本体构建与生长、异构超图构建、时空嵌入场建模等关键技术研发。综合以上平台基础设施和数据共享策略，建立阶梯式数据开放与增值回馈机制，对基础海洋数据实行免费开放，对增值加工数据实行市场化定价，鼓励科研机构、企业、行业用户参与数据融合与价值创造，形成适应技术新范式需求的“大集成、大整合”的可持续联合模式。

3.3 拓展海洋行业应用增值渠道

推动海洋数字地球技术与行业应用深度融合，通过核心范式引领，创新应用增值模式。在海洋能源领域，构建海上风电、潮汐能等项目的全生命周期监测与运维决策系统，提供台风、海浪、地质稳定性等多要素协同预测服务；在深海资源勘探领域，开发智能勘探决策平台，整合地质构造、生物分布、化学元素浓度等数据，实现勘探区域优选与开采方案优化；在海洋生态保护领域，建立海洋生物多样性、海洋保护区、化学污染扩散等动态监测与预警系统，支撑生态

红线管控与修复方案制定；在航运安全领域，打造“气象-海况-地质-航运”一体化决策平台，提供航线优化、风险预警等服务。鼓励传感器运营企业与行业用户深度合作，激活历史数据资产价值，联合开展信息增值服务，打通传感器数据到行业应用的“最后一公里”，激活传感器价值，增强行业应用的获得感，推动海洋产业创新升级。

4 总结

数字地球技术与海洋环境保障的交叉融合，为解决海洋多要素一体化表征、跨尺度预测、智能决策等难题提供了新路径。本文提出的“时空嵌入场+本体”混合体表征、“多周期时间分解-跨尺度结构转换”时空骨架、“结构-语义-效用”信息跃迁三大核心范式，有效整合了海洋物理、生物、地质、化学等多源要素，揭示了海洋现象的时空演化规律，实现了从原始数据到决策知识的价值提升。通过明确国家级基础设施定位、创新数据融合建设模式、拓展行业应用增值渠道，可推动我国自主可控的海洋数字地球技术体系建设与产业应用。随着人工智能、大数据、物联网等技术的持续发展，海洋数字地球将在全球海洋治理、海洋资源开发、海洋生态保护等领域发挥更重要的作用，为建设海洋强国提供坚实支撑。

参考文献

1 郭华东, 刘珍, 王长林. 国际数字地球学会二十年: 回顾与前瞻. 中国科学院院刊, 2024, 39(12): 2131-2139.
Guo H D, Liu Z, Wang C L. Twenty years of International Society for Digital Earth: Review and prospect. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(12): 2131-2139. (in Chinese)

2 郭华东, 邵芸, 杨崇俊, 等. 数字地球基础理论研究报告. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2003.
Guo H D, Shao Y, Yang C J, et al. Digital Earth Fundamental Theoretical Research Report. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)

3 吴立新, 荆钊, 陈显尧, 等. 我国海洋科学发展现状与未来展望. 地学前缘, 2022, 29(5): 12.
Wu L X, Jing Z, Chen X Y, et al. Marine science in China: Current status and future outlooks. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 12. (in Chinese)

4 Maike S. observationsBridging, theory and numerical simulation of the ocean using machine learning. Environmental Research Letters, 2021, doi: 10.1088/1748-9326/ac0eb0

5 Gore A. The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st century. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1998, doi: 10.1016/S0375-6505(98)00007-8.

6 Binder J. Earth to Google: Satellite images on your screen. Aerospace America, 2005, 43(11): 18-20.

7 Lam R, Sanchez-Gonzalez A, Willson M, et al. Learning skillful medium-range global weather forecasting. Science, 2023, 382: 1416-1421.

8 Mildenhall B, Srinivasan P P, Tancik M, et al. NeRF: representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. Communications of the ACM, 2022, 65(1): 99-106.

9 Brown C F, Kazmierski M R, Pasquarella V J, et al. Alphaearth foundations: An embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data. arXiv, 2025: 2507.22291.

10 Aaron B, Amit A, Amr H, et al. Earth AI: Unlocking geospatial insights with foundation models and cross-modal reasoning. arXiv, 2025: 2510.18318.

11 郭华东. 数字技术让人类用全新视角“解码”地球. 中国科技产业, 2025, (7): 16.
Guo H D. Digital technology allows humanity to “decode” the Earth from a completely new perspective. China Science and Technology Industry, 2025, (7): 16. (in Chinese)

12 李献斌, 马超, 杨俊. Palantir公司人工智能技术体系及其军事应用. 国防科技, 2025, 46(2): 28-35.
Li X B, Ma C, Yang J. Palantir company’s artificial intelligence technology system and its military applications. National Defense Science and Technology, 2025, 46(2): 28-35. (in Chinese)

13 Feng Y, You H, Zhang Z, et al. Hypergraph neural networks. Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. 2019, 33(1): 3558-3565.

14 Wang Q, Zhou W, Zeng L, et al. Intraseasonal variability of cross-slope flow in the northern South China Sea. Journal of Physical Oceanography. 2020, doi: 10.1175/JPO-D-19-0293.1.

15 Wang Q, Zeng L, Chen J, et al. The linkage of kuroshio intrusion and mesoscale eddy variability in the Northern South China Sea: Subsurface Speed Maximum. Geophysical Research Letters. 2020, 47(11), doi: 10.1029/2020GL087034.

16 Uhe P, Lucas C, Hawker L, et al. FathomDEM: An improved global terrain map using a hybrid vision transformer model. Environmental Research Letters, 2025, 20(3): 034002.

17 王圣洁. 我国海洋地质知识体系DIKW模型及其规模估计与增长研究. 中国地质调查, 2018, 5(5):6-16.
Wang S J. Research on the DIKW model of China’s marine geology knowledge system and its scale estimation and growth. China Geological Survey, 2018, 5(5): 6-16. (in Chinese)

18 汪跃, 唐志军, 车德朝, 等. 战场态势一张图技术综述. 指挥信息系统与技术, 2020, 11(1): 6.
Wang Y, Tang Z J, Che D Z, et al. The integrated operational picture in battlefield management: A comprehensive survey. The Integrated Command, Control, and Information Systems (C2IS) Technology, 2020, 11(1): 6. (in Chinese)

19 郭华东, 王长林. 数字地球:十五年发展与前瞻. 中国科学院院刊, 2013, (z1): 59-66.
Guo H D,Wang C L. Digital Earth: Fifteen years experience and perspective. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, (z1): 59-66. (in Chinese)

Innovative applications and development paths of Digital Earth technology in marine environmental support

LIU Junyi* LIU Xiongfei WANG Zongji ZENG Zhihong XIE Huiping LIU Siye

（Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China）

Abstract The convergence of Digital Earth technologies and the field of marine environmental support represent a significant trend in global scientific and technological advancement. In response to the characteristics of marine environmental data such as sparsity, dynamic complexity, and multi-scale interdependence, and by integrating the evolution of international Digital Earth technology with China's independent innovation practices, this study constructs three core methodological paradigms. The first is the element-integrated ontology, which proposes a hybrid representation paradigm of "spatiotemporal embedded field + ontology" to achieve integrated and dynamically evolving modeling of marine physical environments alongside geological, biological, chemical, and other multidimensional elements. The second is the cyclically nested spatiotemporal principle, introducing a spatiotemporal framework of "multi-period temporal decomposition and cross-scale structural transformation" to provide a physically interpretable and uncertainty-quantifiable predictive framework for complex marine phenomena. The third is the information transition and value-adding method, which establishes an information transition mechanism of "structure-semantics-utility" to facilitate the transformation and enhancement of massive raw data into high-value decision-making knowledge. Building on the above research, targeted policy recommendations are proposed across three dimensions: national-level infrastructure planning, data fusion development models, and value-adding channels for industrial applications. These recommendations aim to support the development and industrial implementation of an autonomous and controllable marine Digital Earth technology system in China.

Keywords Digital Earth, marine environmental support, convergence of technologies, policy recommendations

刘俊义　中国科学院空天信息创新研究院研究员。主要研究领域:数字地球技术、多源信息融合、人工智能应用等。E-mail: liujy004735@aircas.ac.cn

LIU Junyi Professor of Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences. His research focuses on Digital Earth technology, multi-source information fusion, artificial intelligence applications, etc. E-mail: liujy004735@aircas.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author