

数字化赋能全域生态环境动态监测架构分析

王雪纯 徐阳坤

衢州市生态环境局常山分局 浙江 衢州 324200

摘要：本文立足全域协同、数字孪生等理论，结合空天地一体化感知、AI、大数据等数字技术，拆解全域生态环境动态监测四层总体架构与跨区域协同体系，剖析当前感知布局失衡、数据孤岛、联动机制薄弱、运维成本偏高四大痛点。从感知、数据、功能、协同四层提出多维优化策略，并配套制度、技术、资源三重落地保障。研究完善数字化生态监测体系，破解行政与业务壁垒，助力构建预判-监测-预警-治理闭环治理模式，提升全域生态综合治理智能化水平。

关键词：数字化赋能；全域生态环境；动态监测架构

引言：生态文明建设背景下，跨域生态治理、全要素环境管控需求持续攀升，传统碎片化、事后式生态监测模式，存在覆盖不足、响应滞后、协同性弱等短板，难以适配全域生态动态监管需求。伴随数字技术迭代，数字化赋能成为重构生态监测体系的核心路径。本文界定核心概念与技术理论基础，解构监测多层级架构，深挖现存落地痛点，针对性提出优化方案与保障举措，为全域生态监测体系搭建、跨域环境协同治理提供理论参考与实践思路。

1 核心概念与理论、技术基础

1.1 核心概念界定

全域生态环境动态监测是指综合运用多源感知手段，对大气、水体、土壤、生物等生态要素进行全天候、多尺度、连续性的数据采集与状态跟踪。监测范围覆盖行政区划全境及跨域生态廊道，核心指标包括环境质量指标（如PM_{2.5}、水质类别）、生态状况指标（如植被覆盖度、生物多样性指数）及污染源排放指标。

数字化赋能是以数字技术为驱动，对生态环境治理的对象、流程、决策方式进行系统性重构与能力提升。赋能维度涵盖数据赋能（全域数据贯通）、技术赋能（智能分析工具）、组织赋能（协同平台）与决策赋能（仿真推演），赋能逻辑遵循“数据采集—融合分析—预警决策—闭环处置”的价值链条。

生态环境监测系统架构由感知层（空天地传感终端）、数据层（多源数据汇聚与治理平台）、分析层（AI模型与数字孪生引擎）及应用层（业务协同与决策支持系统）四大核心构成要素组成，实现从原始数据到治理效能的层级转化^[1]。

1.2 基础理论支撑

全域协同治理理论强调跨区域、跨部门、跨层级的

多元主体协同行动，在生态环境监测中体现为数据共享、业务联动与责任共担，打破信息孤岛与行政壁垒。

生态系统整体性理论主张将大气、水、土壤等环境要素视为不可分割的生命共同体，要求监测体系具备多介质关联分析能力，支撑系统性的生态问题识别与修复。

数字孪生治理理论通过构建物理生态空间的虚拟映射，实现实时状态同步与未来情景推演；数据中台治理理论则提供统一的数据标准、接口与服务封装，支撑跨业务的数据复用与敏捷响应。

1.3 数字化核心赋能技术适配分析

空天地一体化遥感感知技术适配大范围、高频次、难到达区域的监测场景，卫星遥感宏观筛查、无人机精准复核与地面站点验证相互印证，形成立体监测网络。

大数据与云计算技术支撑全域异构数据的汇聚、清洗、存储与批流一体处理，解决多源数据格式不一、体量庞大、实时性要求高等难题，保障数据融通与算力弹性。

AI智能识别技术适配污染源自动锁定、异常排放行为检测等场景；数字孪生技术赋能动态预警与仿真推演，支持“若则”情景分析，提升风险响应前瞻性。

物联网与5G传输技术实现前端感知设备的状态自感知、低功耗长续航部署与监测数据的毫秒级实时回传，确保预警信息快速触达指挥中心与移动终端。

2 数字化赋能全域生态环境动态监测总体架构解构

2.1 监测架构总体设计原则与设计目标

架构设计原则：全域协同性原则要求打破行政与业务边界，实现跨层级、跨区域监测资源的统筹调度；实时动态性原则保障数据从感知到决策的秒级响应能力；兼容性原则支持多厂商、多协议、多代次设备的无缝接入；安全性原则覆盖数据采集、传输、存储与使用全生命周期的加密与权限管控；可拓展性原则确保架构能够适应未来新

增监测要素、更大数据规模及新兴技术融合。

短期目标：聚焦基础能力建设，重点打通省—市—县及跨省交界监测数据壁垒，统一数据接口标准与传输协议，实现大气、水、土壤等核心要素的全域联动采集，消除重复采集与数据盲区，初步形成覆盖全域的监测数据一张网。

长期目标：构建“预判—监测—预警—治理”闭环全域监测体系。依托历史数据与仿真模型实现生态风险的事前预判，通过实时监测动态验证与修正预判结果，建立分级分类预警触发机制，最后将治理效果反馈至模型迭代，形成自优化的治理闭环。

2.2 多层级全域生态动态监测物理架构拆解

前端感知层：布局空天地水一体化监测终端。天基以高分卫星、环境监测卫星为主，实现宏观扫描与热点筛查；空基部署无人机及无人飞艇，用于重点区域加密巡查与应急追踪；地基布设自动监测站、微型空气站、水质浮标等固定与移动设备；水基结合水下传感器与声学探测。各终端统一编址、统一时钟同步，确保多源数据的空间与时间基准一致。

网络传输层：搭建多制式融合数据传输链路。骨干网采用光纤专线保障大带宽、低时延的批量数据回传；边缘区域使用4G/5G公网承载高频次、小包数据；偏远无信号区则采用北斗短报文或窄带物联网进行周期性数据上报。同时部署智能网关，根据数据优先级与网络状态动态选择最优链路^[2]。

云端存储层：构建全域生态异构数据分布式存储架构。采用混合存储方案，结构化监测数据存放于时序数据库，非结构化影像、视频存放于对象存储，半结构化日志存放于分布式文件系统。引入数据分片与多副本机制，在区域中心与省级节点实施两级冗余备份，保障数据高可用与灾备恢复能力。

2.3 数字化赋能逻辑业务功能架构分析

数据中台层：部署全域生态数据清洗、融合、标签化处理模块。清洗模块针对传感器漂移、传输丢包等异常进行数据校验与修补；融合模块依据时空基准，将卫星反演、站点实测与移动监测数据进行协同反演与插值融合；标签化模块为每个数据点赋予地理、时间、要素类型、数据来源等多维标签，支撑后续的高效检索与特征工程。

智能分析层：配置生态态势研判、污染溯源、动态变化分析模块。态势研判模块通过聚类与趋势识别，自动概括全域生态质量等级及变化趋势；污染溯源模块结合扩散模型与风场、水文数据反向推演污染源位置与强

度；动态变化分析模块利用时序分割算法，识别植被、水体面积等生态指标的突变点与季节性规律。

业务应用层：建设分区分管、应急预警、政务协同、公众公示子系统。分区分管子系统基于生态功能区划，自动生成差异化管控策略与考核评价；应急预警子系统根据阈值触发红色/橙色/蓝色预警，并推送处置建议；政务协同子系统支持跨部门任务派发、进展追踪与结果上报；公众公示子系统通过小程序、网页向公众发布环境质量信息与公告^[3]。

2.4 全域跨区域协同联动架构设计

跨行政区域监测节点联动架构：在交界地带设置协同监测断面，双方共享实时数据并采用同一算法模型进行联合研判。当上游污染物临近边界时，上游节点自动触发通报，下游节点主动加密监测频率并启动响应预案，形成“预警—通报—联动加密”的闭环流程，从机制上消除行政分割导致的监测响应滞后。

山水林田湖草全要素生态监测联动架构：以流域或生态系统为单元，将森林、农田、湿地、湖泊等不同要素的监测节点按生态过程进行语义关联。例如，在山区与下游水库之间建立“降雨—径流—泥沙—水质”链式监测触发器，任一要素出现异常自动唤醒关联要素的协同分析，实现跨介质耦合监测而非孤立观测^[4]。

监管部门、运维单位、属地政府权责协同架构：监管部门作为数据运营中心，负责监测标准的制定、异常数据的审核与治理指令的签发；运维单位承担感知终端的日常巡检、故障修复与数据质量核验，并定期提交运维报告；属地政府作为治理责任主体，接收预警信息与任务工单，反馈现场处置情况与整改佐证。三者平台中实现“发现—派单—处置—核验”闭环协同，权责清晰且全程留痕。

3 架构现存问题、优化策略与落地保障

3.1 当前现有全域生态监测数字化架构现存痛点

底层感知架构：区域监测终端布局不均，生态要素覆盖缺口大。感知终端多集中于城市建成区、重点污染源周边，而农村、生态涵养区、省际盲区及高海拔水域布点不足。森林生物多样性、土壤重金属、地下水等缺乏实时监测，存在结构性失衡。

数据架构：数据标准不统一，全域数据孤岛突出。不同部门、厂商设备采用各异协议、单位、坐标和时间戳，多源数据难以关联。环保、水利、自然资源等系统相互独立，跨系统调用需大量人工转换，制约快速研判。

业务架构：动态预判能力薄弱，跨区域联动机制缺失。现有系统以“事后评价”为主，缺乏机理模型与AI

融合的动态预判,对突发污染漂移、水华暴发等缺乏超前预警。跨省、市联动仍为“电话+函件”,缺乏统一调度平台和自动化响应流程,应急滞后数小时以上。

运维架构:系统兼容性不足,迭代运维成本高。早期系统采用封闭软硬件,接口不开放,新设备接入需定制开发。缺乏统一运维工具,巡检、故障定位依赖人工,随终端数量增长,人力资金成本指数级上升,制约持续迭代。

3.2 数字化赋能全域监测架构多维优化策略

感知层优化:补齐偏远区域终端,搭建全要素一体化感知网络。在监测盲区部署低功耗物联网传感器、无人机自动机库及移动监测车,实现“固定+移动”互补;将大气、水质、土壤、噪声、生态遥感等多类终端统一接入同一感知管理平台,形成覆盖山水林田湖草沙全要素的一体化感知体系,消除要素间的监测断层。

数据层优化:统一全域生态数据标准,搭建一体化数据中台。制定并发布全域生态数据采集、传输、存储与交换标准规范,强制推行统一的数据编码、计量单位与时空基准。在此基础上建设一体化数据中台,内置数据清洗、质量校验、主数据管理及API网关,实现跨部门数据的“一次汇聚、全域共享”,从根源上破解数据孤岛。

功能层优化:嵌入AI预测模型,完善动态监测与超前预警功能。引入基于深度学习的时序预测模型(如LSTM、Transformer)和物理信息神经网络,对空气质量变化、水质演变进行未来72小时滚动预测;开发多源数据驱动的污染溯源及扩散推演引擎,将预警模式从“阈值触发”升级为“趋势触发”,实现风险早于事件发现^[5]。

协同层优化:重构跨区域、跨部门一体化联动业务架构。建设全域生态环境协同指挥平台,打通环保、水利、林草、气象等部门业务系统,建立“统一预警、自动派单、联合处置、闭环反馈”的业务流程。对上下游交界断面设置联动监测触发器,上游数据异常自动向下游通报并同步加密监测指令,形成制度化的区域协同响应机制。

3.3 优化后架构落地实施保障措施

制度保障:完善全域生态监测数字化管理配套政策规范。制定《全域生态环境监测数据管理办法》《跨区

域监测联动工作规程》等规范性文件,明确数据权属、共享边界、保密要求及联动响应时限;将数字监测能力建设纳入地方政府绩效考核,形成制度约束与激励机制并重的政策环境。

技术保障:搭建技术运维团队,完成架构迭代升级。组建由数据工程师、AI算法专家、硬件维护人员构成的多级技术运维团队,省级负责平台中台与模型训练,市县负责前端设备与本地数据接入。建立季度架构评审机制,根据技术发展(如6G、量子加密)和业务需求变化,持续迭代数据中台与智能分析模块。

资源保障:统筹财政资金,统筹区域监测资源调配。设立全域生态环境数字化专项基金,采用“省级奖补+市县配套+社会资本参与”的多元投入模式。建立监测设备与运维资源的共享池,对跨区域应急任务可调用邻近区域的无人机、移动监测车等资源,避免重复投资,提升资源利用效率。

结束语

综上,本次研究完成数字化全域生态监测全架构拆解,厘清技术赋能逻辑与现实落地短板,搭建适配全域治理的优化架构与保障体系,补齐原有监测网络、数据体系、联动机制多重缺陷。优化后架构可实现全要素、跨区域动态监测与超前风险预警,打通多方治理协同链路。后续可结合6G、智能算法新技术迭代模型,贴合区域生态差异化需求微调架构,持续夯实数字生态监测底座,赋能区域生态长效保护与高质量发展。

参考文献

- [1]张军辉.数字化驱动下全域生态环境动态监测体系架构重构与运行机制[J].中国环境科学,2025,45(4):191-193.
- [2]刘廷良.天地空一体化全域生态环境监测顶层架构设计与数字化转型路径[J].环境科学研究,2024,37(7):131-135.
- [3]李璐.大数据赋能区域全域生态环境动态监测平台架构优化研究[J].生态经济,2024,40(9):168-174.
- [4]赵晓伟.数字孪生技术支撑下生态环境全域动态监测分层架构构建[J].环境工程技术学报,2025,15(2):89-96.
- [5]陈曦.跨区域全域生态环境协同监测数字化架构痛点与优化策略[J].环境保护,2023,51(18):56-61.