主持人：宋希强，任明迅　Open Access

智慧化数据集成技术在海南热带雨林国家公园的展望
——以睡莲属植物为例

陈余晨[1,2#]，张小龙[1,2#]，陈　飞[1,2*]
（1. 海南国家公园研究院，海南 海口 570203 中国；2. 海南大学三亚南繁研究院，海南 三亚 572025 中国）

摘　要：海南作为中国生物多样性保护的核心区域，孕育了延药睡莲（*Nymphaea nouchali* Burm. f.）等珍稀野生睡莲（*Nymphaea* L.）资源，其生态保护与恢复工作亟需科技赋能。智慧化数据集成技术通过多源数据融合与智能分析，解决国家公园睡莲保护中监测碎片化、保护精准度不足等关键性问题。文章系统梳理海南野生睡莲的物种资源现状与保护挑战，重点阐述智慧化数据集成在睡莲生境监测、种群动态追踪、气候变化响应等领域的应用机制，深入分析“天空地”一体化监测、大数据平台构建、人工智能分析等前沿技术的集成应用模式，并结合国家公园生态保护需求，通过构建‘天空地’一体化监测体系，实现了对睡莲属植物的精准监测与保护，为推动热带雨林湿地生态系统保护科学化、物种恢复精准化及管理现代化提供理论参考与技术支撑。

关键词：智慧化数据集成技术；海南热带雨林国家公园；野生睡莲；生物多样性保护；天空地监测；生态恢复
中图分类号：S4;X853;X859　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674 − 7054(2026)05 − 0815 − 10
陈余晨, 张小龙, 陈飞. 智慧化数据集成技术在海南热带雨林国家公园的展望——以睡莲属植物为例[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(5): 815−824.　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.20250138
CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswxb.20250138

作为湿地生态系统的核心物种之一，野生睡莲（*Nymphaea* spp.）在科研、观赏及生态功能方面具有重要价值，对水生态平衡、涵养水源和碳汇等功能具有显著作用。水生植物如睡莲通过改善水质、提供栖息地和食物来源，支持湿地生态系统的稳定与多样性。然而，海南的野生睡莲资源正面临诸多挑战，特别是在生境破坏、人为干扰和气候变化的多重压力下。延药睡莲（*Nymphaea nouchali*）等物种已呈现濒危状态，自然分布范围持续萎缩，种群数量仅能维持零星分布。当前，国家公园建设正逐步向“科学化监测、精准化保护、现代化管理”转型，智慧化数据集成技术成为连接多源监测信息与保护决策的核心纽带，在大熊猫（*Ailuropoda melanoleuca*）、海南长臂猿（*Nomascus hainanus*）等旗舰物种保护中展现显著成效。与陆生动物监测相比，睡莲等水生植物生境隐蔽，对水文条件高度敏感、光谱特征随环境快速变化，这使其监测需要更高的空间分辨率、更实时的环境感知与更加稳定的数据融合机制。与此同时，国际上“智慧化数据集成”技术在生态保护中的应用呈重要趋势。例如，在澳大利亚，湿地洞察工具利用多年代卫星遥感数据，生成时间序列动态图谱，从而对湿地生态系统进行动态监测[1]。此外，智能传感器通过与互联网、大数据分析和人工智能等技术的协同效应，为作物监测，病害诊断和生态预警等提供技术支撑[2]。本研究针对海南野生睡莲分布零散、生境复杂及监测困难等特点，构建覆盖“物种−生境−生态系统”的智慧化数据集成体系，通过“数据采集−数据融合−智能分析−平台建设−实地验证”的技术路径，能解决传统监测中数据碎片化、响应滞后等问题，更能为生态系统保护、生物多样性维持、濒危物种恢复等关键科学问题提供数据支撑，对推动国家公园生态保护模式创新具有重要现实意义。

CC BY 4.0
收稿日期：2025−10−15　**修回日期：**2025−12−15
基金项目：国家自然科学基金面上项目（32172614）
#**第一作者：**陈余晨（2002—），男，海南大学南繁学院 2025 级硕士研究生。E-mail: yuchenniel@163.com
张小龙（1998—），男，海南大学热带农林学院 2024 级硕士研究生。E-mail: zhangxiaolong1108@163.com
*通信作者：陈飞（1988—），男，教授。研究方向：智慧育种、生物信息学、作物生物学。E-mail: feichen@hainanu.edu.cn

1 研究背景与核心问题界定

1.1 野生睡莲保护的现实紧迫性 海南作为中国热带生态系统的“基因库”，其湿地子系统孕育了以延药睡莲为代表的特有野生睡莲资源，这类物种不仅具有重要的遗传多样性价值，同时也在一定程度上反映了热带湿地生态系统的健康状况。延药睡莲的生理特征，尤其是其长期适应海南火山岩湿地及热带季风气候的能力，使其成为研究水生植物适应性进化的重要样本。然而，当前野生睡莲正面临“生存空间压缩–种群衰退–生境恶化”的三重危机。

从分布格局看，多项野外调查数据显示，中国野生睡莲属植物分布极为稀疏，且总体数量呈下降趋势。例如，海南省延药睡莲自然分布图（图 1）的 7 个自然分布点中，发现多个区域的植株数量均达不到 30 株[3]；雪白睡莲（*Nymphaea candida Presl*）在博斯腾湖中 1 225 ㎡ 的勘探样地面积中，仅发现 46 株野生种[4]。相关研究表明，气候变化、水体富营养化、湿地碎片化，以及人类活动的干扰，都会造成睡莲属植物环境适应性下降，使其面临濒危[5]。

图 1 海南省延药睡莲自然分布图

Fig. 1 Natural distribution map of *N. nouchali* in Hainan Province.

注：审图号：琼 S（2025）111 号。

Note: The Approval Number: Qiong S (2025)No. 111.

在此背景下，“十四五”保护规划明确将野生睡莲列为“濒危物种拯救工程”重点对象，要求 2025 年前实现种群动态的精准监测与保护，但传统保护模式仍存在明显短板 —— 依赖人工季度巡护导致数据时效性差，监测指标仅限于植株数量，缺乏生境因子、遗传多样性等关键数据的联动，难以支撑科学决策，亟需通过技术创新突破瓶颈[6]。

1.2 智慧化数据集成技术的应用适配性 智慧化数据集成技术通过“多源数据融合–实时动态分析–决策精准赋能”的逻辑，为野生睡莲保护提供了技术解决方案，其核心优势与野生睡莲保护需求高度契合。

从监测维度看，卫星遥感（如高分 6 号宽幅相机），其多光谱分辨率为 16 m，可实现湿地植被覆盖度月度监测，精准识别睡莲群落分布范围变化[7]；无人机多光谱航拍（搭载 Micasense RedEdge 传感器）能获取 10 cm 分辨率的植株叶绿素含量、叶片水分等生理指标，解决地面调查样本限制问题；物联网传感网络（布设水位、溶解氧、pH 传感器）可实现生境参数的分钟级采集，实时监测水位骤降及水质突变等应急变化；结合分子标记技术采集的遗传数据，形成“宏观–中观 –微观”三层监测数据链，覆盖睡莲“生境–个体–种群”全维度[8]。

从数据应用看,国内已有成熟技术案例可借鉴:三江源国家公园通过“遥感 + 物联网”集成数据,实现藏羚羊迁徙路径的动态预测;武夷山国家公园基于大数据平台整合的植物监测数据,优化了珍稀植物原生境保护区域划定。针对野生睡莲“分布散、生境杂、易受干扰”的特点,智慧化数据集成可克服传统监测中“数据碎片化、分析孤立化、响应滞后化”的不足,例如通过多源数据融合揭示“水位下降–叶片生理变化–种群衰退”的因果关系,为人工补水、生境修复提供精准阈值参数[9−10]。

2　野生睡莲资源现状与保护挑战

2.1　物种资源与分布特征　海南独特的热带湿地生态环境孕育了丰富的睡莲资源,其中,延药睡莲作为该地区典型野生种类,是中国原生热带睡莲种类之一。延药睡莲自然分布集中在海南五源河上游、三亚及海口羊山湿地等区域,该分布区与火山口湖泊湿地形成高度耦合,特定的水质和土壤条件为其提供了适宜生境。然而对生境条件要求严格,水质、水文节律及土壤成分的变化都可能导致种群衰退,一旦生境条件被破坏,其恢复难度较大。

目前,海南野生睡莲呈现“点状分散、生境特异”的格局。例如,延药睡莲在海南的种群数量极少,且各分布点规模不一。多数分布点尚未纳入保护范畴,因而易受外来物种入侵及人为活动干扰,进一步加剧物种濒危风险。尽管海南地区除原生种群外,还存在一些栽培品种,如‘春秋’和‘火凤凰’,这些品种在本地的气候条件下表现出良好的适应性。然而,当前的保护工作的重心应聚焦于野生种群,尤其是面临濒危威胁的种群。

2.2　濒危成因与保护现状

2.2.1　核心威胁因素　海南野生睡莲的濒危是自然因素与人为干扰共同作用的结果。人为干扰方面,城市化进程导致湿地生境碎片化,五源河等流域的水质污染与外来物种入侵进一步提高了睡莲的生存风险,海口羊山湿地的邢氏水蕨(*Ceratopteris shingii*)等伴生保护植物同样面临人为干扰威胁,侧面反映出睡莲生境的脆弱性[11]。自然因素方面,气候变化引发的降水格局改变与极端天气事件,进一步压缩了睡莲的生存空间,而其自身繁殖能力较弱、种群更新缓慢的生物学特性,增加了其濒危风险。

2.2.2　现有保护措施与不足　目前已针对野生睡莲开展初步阶段的保护工作,海口市湿地保护管理中心的生态监测报告系统调查了延药睡莲等植物的生物学特性、生境类型及种群特征,并通过生态环境改善促进种群恢复。在监测体系建设方面,海南热带雨林国家公园已构建“智慧雨林大数据中心平台”,实现水、土、气、生等生态因子的联网监测,智慧巡护 APP 使用率接近 100%,为睡莲监测提供了基础支撑。

但现有保护工作仍存在明显不足:首先,监测针对性不强,现有“天空地”一体化监测体系主要聚焦于海南长臂猿(*Nomascus hainanus*)等旗舰物种,针对睡莲等水生植物的专项监测设备与指标体系缺失;其次是数据共享程度低,植物学研究数据、湿地监测数据与气象数据分散于不同部门,未形成统一的数据管理平台;最后,保护技术精准度不足,缺乏基于数据驱动的个性化恢复方案,导致保护措施实效性有限[12]。

2.3　国家公园保护的核心需求　建设对野生睡莲保护提出了明确需求,主要可概括为三方面:一是全面掌握资源现状,需要通过精准监测获取睡莲种群数量、分布范围及生境质量的现状信息;二是建立动态预警机制,以实时追踪生境变化对睡莲种群的影响,并提前评估濒危风险;三是优化生态修复策略,基于长期监测数据制定科学的恢复方案,从而提高保护措施的针对性与有效性。

3　野生睡莲智慧化数据采集技术体系

针对野生睡莲分布零散、生境复杂及人工调查难度大等现实挑战,需构建融合空天遥感、地面物联与移动巡护的智慧化数据采集技术体系,以实现多尺度、全周期的精准监测。

3.1　空天遥感监测技术　遥感技术依托其大范围覆盖、周期性观测及非接触特性,已成为监测野生睡莲生境格局及群落动态的主要技术手段”,需针对“山地多、湿地碎片化”的地形特征,选择适配的遥感平台与数据类型。遥感技术主要分为卫星遥感和无人机遥感。在卫星遥感层面,优先选用高分系列卫星(高分 6 号、高分 7 号)与 Sentinel-2 卫星数据:相关研究表明,在三江源国家自然保护区,GF−1 和 GF−6 的卫星影像被利用于湿地恢复的变化监测,结果显示,GF−6 不仅适用于静态水

体的监测，还可用于监测湿地的动态变化[13]。此外，结合多时相遥感数据和归一化植被指数（normalized difference vegetation index, NDVI）和水体指数（normalized difference water index, NDWI），可精确监测湿地植物的生境变化，尤其在水位波动较大的地区具有良好效果。李斌等[14]通过采用多时相的 Sentinel-2 卫星数据与相关指数构建，进行湿地植被分类制图，结果显示总体分类精准率高达 86%。在无人机遥感层面，针对卫星数据分辨率不足与云层遮挡问题，采用多旋翼无人机（大疆 M300 RTK）搭载多光谱传感器（Micasense RedEdge-MX）开展中尺度监测，飞行高度控制在 50 ~ 80 m，获取 10 cm 分辨率的多光谱影像：通过红边波段反射率反演睡莲叶片叶绿素含量，判断植株生长健康状况；利用正射影像拼接技术生成睡莲分布区的三维模型，统计群落密度与覆盖度，解决了人工调查难以覆盖大面积湿地的问题[15]。此外，针对海南热带季风气候导致的雨季多云天气，可引入合成孔径雷达（synthetic aperture radar, SAR）数据（如 Sentinel-1），通过雷达波的穿透性实现全天候监测，捕捉暴雨后睡莲生境的水位骤变与群落受损情况，为应急保护提供实时数据支持。

3.2 地面物联网感知技术 地面感知技术聚焦于睡莲生境微环境与植株状态的实时监测，需针对睡莲的生态需求布设专用传感设备。在生境监测方面，可在睡莲分布区布设水位传感器、水质传感器（监测 pH、溶解氧、氮磷浓度等指标）及土壤传感器，实时采集水文与土壤数据，这些指标的变化直接影响睡莲的生长状态[16]。目前已实现 4 个生态系统定位观测站的组网监测，睡莲监测传感器可接入现有网络，以实现数据共享。

在植株监测方面，可采用非接触式传感技术，以减少对睡莲的干扰，如利用红外传感器监测植株生长速率，利用图像传感器获取叶片形态变化。东北虎豹国家公园利用基于卷积神经网络（CNN）的图像识别算法已实现 30 多种动物的识别分类，类似技术可优化后应用于睡莲叶片病害与胁迫状态的自动识别，提升监测的智能化水平[17]。

3.3 移动巡护与分子数据采集 移动巡护作为监测工作的补充手段具有重要作用，护林员已配备智慧巡护 APP，通过终端实时记录睡莲的分布点位、生长状况及生境干扰情况。在巡护过程中，可同时采集睡莲的叶片、根和茎的分子样本，并采用植物分子系统学常用的叶绿体基因组、ITS 等序列进行系统发育与种群遗传结构分析，利用分子数据构建种群遗传结构图谱，为生物多样性维持机制研究提供数据支撑[18]。

为提升巡护效率，可借鉴三江源国家公园的经验，为巡护人员配备卫星定位仪与红外相机，对难以到达的沼泽区域进行远程观测。同时，在巡护 APP 中增加睡莲专项监测模块，实现观测数据的标准化录入与即时上传，确保数据的时效性与完整性[19]。

3.4 技术难点及解决方案 在海南热带雨林国家公园，睡莲属植物的智慧化数据集成应用面临的首要技术难题在于复杂生境下的数据精准采集与实时传输。公园内的睡莲主要分布在林下溪流、季节性沼泽等隐蔽区域，高湿度和强植被遮挡导致卫星遥感信号严重衰减，无人机低空探测也易受枝叶干扰，难以准确识别睡莲群落边界及个体生长状态[20]。此外，部分珍稀睡莲品种，种群规模小且分布零散，如何在保护原生境的前提下，实现小范围种群的数据全覆盖，进一步增加了采样设计与设备部署的技术门槛[21]。针对上述瓶颈，当前主要通过多技术融合与适应性优化来突破。在数据采集层面，采用“微型传感器 + 红外相机 + 无人机光谱成像”的集成方案：微型传感器采用 Bosch BME680，该传感器具有防水防腐特性，适用于高温高湿的环境，可嵌入睡莲生长的水体或土壤中，实时监测环境因子；红外相机采用 FLIR Lepton 3.5，支持 SPI 协议，与传感器相连以实现数据交换。可用于记录睡莲的物候变化及传粉者活动，从而减少人工观测的干扰；无人机搭载高光谱相机，能够穿透中层植被，精准识别睡莲群落的空间分布及覆盖度。同时，针对珍稀小种群，研发便携式手持光谱仪，结合 GIS 定位技术，可在不破坏生境的前提下完成精准采样，有效解决了小范围种群数据采集的难题，为睡莲资源的保护与研究提供了可靠的技术支持。

4 野生睡莲智慧化数据集成框架构建

数据集成是实现多源信息价值最大化的核心环节，需解决数据标准化、融合分析与平台构建 3 大关键问题，为睡莲保护决策提供一体化支撑。

4.1　数据标准化处理　在生态环境监测中, 多源数据异质性是数据集成过程中的核心挑战, 因此, 应建立统一的标准化处理流程。目前, 已有相关研究通过建设数据共享平台, 将多源数据通过标准化的方法整合为统一的复合格式, 进行生态风险评估[22]。针对睡莲特性, 在数据采集阶段制定“海南野生睡莲监测数据规范”, 明确不同来源数据的采集指标、精度要求与格式标准: 遥感数据采用 WGS84 坐标系与 GeoTIFF 格式, 地面传感数据统一为 10 min 采样频率与 JSON 格式, 巡护数据按照“时间–地点–指标–状态”4 维结构录入。

其次, 构建数据清洗与校验机制, 通过异常值检测算法剔除传感器故障数据, 利用空间插值法补充缺失的生境监测数据, 结合实地核查验证遥感解译结果。最后, 建立数据质量评价体系, 从完整性、准确性、时效性 3 个维度对数据进行分级, 确保进入集成系统的数据满足应用要求。

4.2　多源数据融合分析

4.2.1　数据融合层次　按照“数据层 –特征层–决策层”的 3 级融合架构开展融合分析。1)数据层融合层: 完成同类型数据的整合, 如将不同时期的无人机影像进行配准叠加, 生成睡莲分布时序数据集; 2)特征层融合层: 提取多源数据的关键特征信息, 结合遥感反演的植被指数与地面监测的水质数据, 构建睡莲生境质量评价模型; 3)决策层融合层: 基于多维度指标开展综合分析与评估, 例如结合种群密度数据、生境变化数据与遗传多样性数据, 评估睡莲的濒危等级与恢复潜力。

4.2.2　核心融合技术　针对睡莲监测数据特点, 可采用 3 类融合技术: 一是空间数据融合技术, 利用 GIS 空间分析功能实现遥感影像与巡护点位数据的空间匹配, 精准定位睡莲种群的空间坐标, 在该技术中, 通过引入机器学习模型, 可提高空间数据处理的智能化水平, 如利用训练模型实现不同湿地类型睡莲的自动识别; 二是时序数据融合技术, 采用卡尔曼滤波算法处理地面传感的时序数据, 用于分析生境因子的动态变化趋势; 三是多模态数据融合技术, 结合图像识别与分子数据, 构建“形态 - 遗传”双重身份识别体系, 实现对睡莲个体级别的追踪。

4.3　智慧化数据平台建设　借鉴“智慧雨林大数据中心平台”的建设经验, 构建野生睡莲专项数据平台架构(图 2)分为 4 层。1)感知层: 整合卫星、无人机、传感器、巡护终端等各类采集设备, 实现数据的实时采集与接入; 2)数据层: 建立分布式数据库, 涵盖物种基础数据库、生境监测数据库及遗

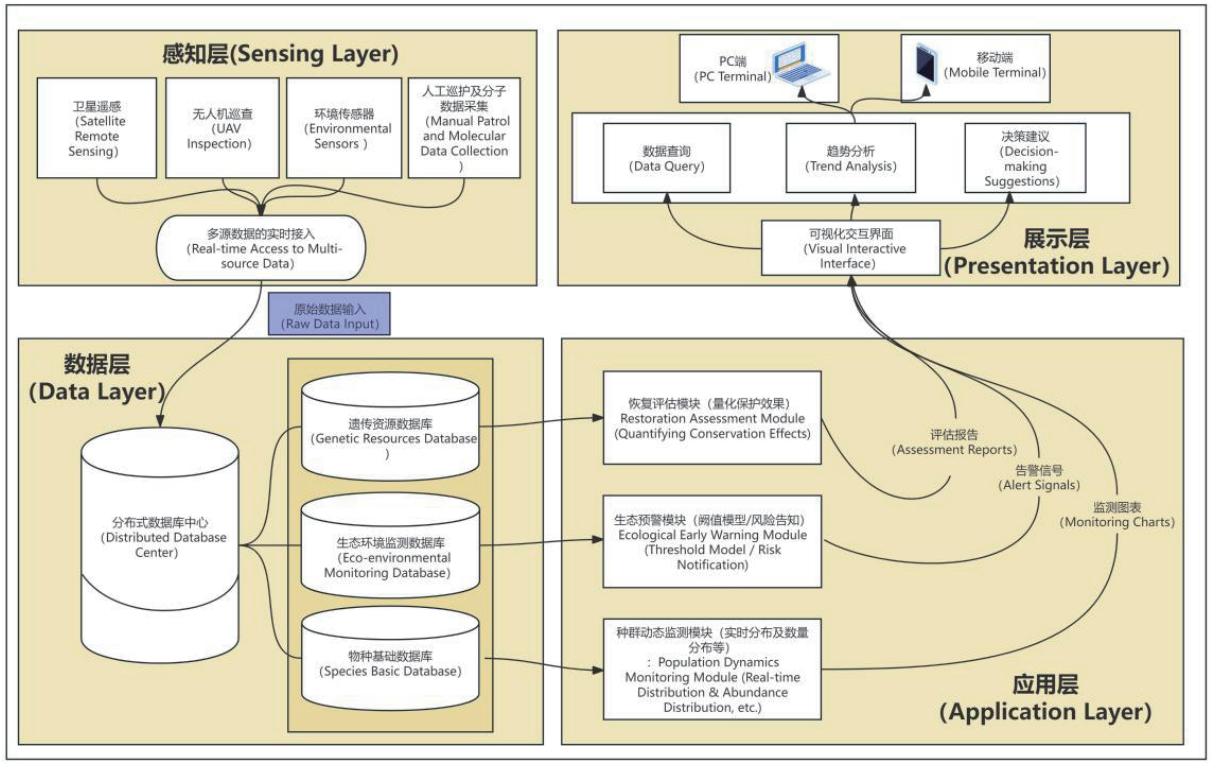

图 2　海南野生睡莲智慧化数据平台架构

Fig. 2　Architecture of the Hainan Wild Water Lily Intelligent Data Platform

传资源数据库 3 大子库；3)应用层：开发 3 大核心功能模块，包括种群动态监测模块(动态展示睡莲的空间分布及数量变化)、生境预警模块(基于阈值模型触发风险告警)、恢复评估模块(定量评估保护措施的实施效果)；4)展示层：通过可视化界面实现数据查询、趋势分析与决策建议的以可视化方式呈现，支持 PC 端与移动端访问。平台需具备数据共享功能，对接国家公园现有生态环境监测网络，实现与其他保护物种监测数据的互联互通。

4.4 数据集成技术难点及解决方案 睡莲的生长周期显著受降雨、水温等微环境因素的影响。因此，需要长期采集水质(pH、溶解氧)、水文(水位、流速)及植物生理(叶片叶绿素含量、开花节律)等多维度数据。然而，传统传感器在高温高湿环境下的故障率约 30%，且不同设备的数据接口不统一，显著增加了实时传输及初步预处理的难度。在数据集成方面，通过构建基于云平台的“多源数据清洗与融合系统”，通过标准化接口将不同设备的数据统一格式，利用 AI 算法剔除异常值，如传感器受暴雨干扰产生的错误数据，并建立睡莲生长模型，实现环境因子与植物生理数据的关联分析。以实际应用为例，利用 AI 工具结合数据融合技术对土壤覆盖变化和水坝建设对环境影响的监测进行分类分析，分别获得 98.75% 和 97.05% 的分类准确率[23]。

5 智慧化数据集成在睡莲保护中的应用实践

5.1 生态系统保护与修复 智慧化数据集成为睡莲生境修复提供精准指导。已有研究表明，多源遥感数据与地面遥感数据的融合分析有助于监测湿地碎片化程度，可识别睡莲核心分布区与生态廊道关键节点，为湿地生态修复工程空间规划提供参考[24]。针对五源河延药睡莲分布区，通过水质传感器数据与遥感水质反演结果的融合分析，能够准确识别污染源头，制定靶向治理方案。

有研究提出“稀有物种作为森林恢复效果指示物种”的新观点，可将该理念应用于湿地生态修复，以睡莲种群密度变化作为评估指标，通过数据平台实时监测修复工程的实施效果，实时优化修复策略[25]。例如，在羊山湿地的修复中，根据传感器监测的水位数据，精准调控水文节律，模拟自然状态下的干湿交替过程，提升睡莲幼苗的成活率。

5.2 生物多样性监测与维持机制研究 数据集成技术为睡莲生物多样性维持机制研究提供了新方法。通过平台整合的种群分布数据与遗传数据，可分析睡莲的种群分化与基因流特征，揭示生境隔离对遗传多样性的影响机制[26]。结合海珠湿地监测研究提出的“大样地 + 公里网格样地”监测体系，在睡莲分布区设置典型样地，通过长期监测数据分析稀有物种与常见物种的共存机制[27]。

在生物多样性监测方面，平台可实现“个体 – 种群 –群落”3 级监测：个体层面通过图像识别技术追踪植株生长状态，种群层面通过无人机航拍统计数量变化，群落层面通过遥感数据分析睡莲与伴生植物的相互作用。这种多尺度监测数据的融合分析，能够全面解析睡莲在湿地生态系统中的功能定位[28]。此外，通过分析睡莲、伴生植物和环境之间的关系，可提高睡莲生态服务功能的评估精度。水位波动作为湿地的重要指标，其变化可显著影响物种与生态功能之间的关系[29]。相关研究表明，湿地的土壤类型与水生植物类型密切相关[30]。

5.3 濒危物种保护与恢复技术优化

5.3.1 种群动态精准追踪 基于数据平台的个体识别与数量统计功能，可用于睡莲种群的全生命周期监测。通过无人机定期拍摄的高分辨率影像，结合 AI 识别算法(YOLO v8)自动计数种群数量，通过比较不同时期的数据，可计算种群增长率、死亡率等关键参数。针对延药睡莲零星分布的特点，利用 GIS 空间分析功能分析种群的扩散趋势，并识别潜在的适宜生境。

5.3.2 恢复技术智能优化 数据集成可促进恢复技术从“经验驱动”向“数据驱动”转型。在人工繁育方面，通过分析传感器监测的水温、光照等数据与幼苗成活率的相关性，优化繁育环境参数；在野外回归阶段，基于平台的生境评估结果，筛选出生态位匹配度最高的回归地点，提高定植成功率。同时，通过对比不同恢复措施下的种群监测数据，建立“措施–效果”关联模型，为制定个性化恢复方案提供数据支撑。

5.4 气候变化响应与适应性管理

5.4.1 气候变化影响评估 通过整合历史监测数

据与气候预测数据,可系统评估气候变化对睡莲的潜在影响。通过分析过去 10 年的气温、降水数据与睡莲种群数量的相关性,确定关键气候影响因子;利用未来气候情景模拟,预测不同排放情景下睡莲适宜生境的空间格局变化,划定气候适应性保护区。针对海南降水减少的趋势,通过水文模型预测湿地水位变化,提前制定补水预案。

5.4.2　适应性管理策略制定　基于数据驱动的适应性管理框架可分为 3 步:首先,通过平台实时分析气候因子与睡莲生长状态的动态关联;其次,建立“监测–评估–调整”的闭环机制,当监测到气候因子超出设定阈值时,系统自动启动评估流程;最后,根据评估结果制定适应性措施,如通过人工调控水位应对干旱胁迫,并通过搭建遮阳设施缓解高温影响。这种动态调整机制能够提升睡莲保护对气候变化的响应效率。

5.5　前沿技术融合应用案例　“电子围栏”技术可为睡莲核心分布区保护提供应用示范,通过在羊山湿地等关键区域布设振动光纤与卡口监控相机,结合 AI 行为识别算法,实现非法入侵与破坏行为的实时监测与预警。在英国威尔士区域,成功应用 AI 模型(YOLO v10)对鸟类进行实时监测,其识别准确率达到 90.56%[31],该技术可适配于睡莲生境监测,减少对生态系统的干扰。

另一个典型案例是遗传数据与监测数据的融合应用: Villa 等[32] 利用监测数据(高光谱影像)与系统发育的多样性指标结合,并通过机器学习模型评估群落的功能结构,其研究结果证明了多源数据融合分析的方法有利于生物多样性的监测及相关研究,可借鉴用于睡莲保护,通过整合遗传数据与监测数据,实现“基因保护-生境保护”的协同管理。

6　讨　论

6.1　技术路线的局限性　本研究提出的技术路线整合了遥感、物联网与移动巡护等多维手段,展现了良好的应用前景,提升了数据采集的实时性与准确性。在全球湿地监测领域,多源技术融合已显示出良好的应用潜力。如综述研究表明,通过遥感与云平台结合可以提高监测效率和精度,尤其在时间序列分析和变化检测中具有明显优势[33]。然而,该技术路线在实际应用中仍面临诸多挑战。首先是复杂湿地环境中的数据采集问题。海南热带雨林地区植被密集、湿度大,这会导致卫星和无人机信号衰减严重,影响监测精度。相关研究指出,在热带湿地地区,由于云覆盖频繁和植被密集,传统光学遥感数据更容易出现数据缺失和光谱混杂现象,对湿地边界和内部水体信息的准确提取受限[34]。其次,目标物种分布零散也是监测难点。海南的野生睡莲等小型群落可能会被现有的监测方法遗漏,这也增加了数据采集的难度。此外,多源数据融合和实时同步仍是技术瓶颈。在大规模生态监测中,不同传感器和数据源在空间、时间分辨率及数据类型上的差异,使得数据同步与时空匹配难以保证,这在全球生态监测项目中仍是核心挑战。综上所述,尽管现有技术已在湿地监测中取得初步应用,但在应对湿地复杂环境和分布零散物种的挑战时,仍需不断优化技术手段,尤其是在多源数据融合、实时同步与高效数据处理方面的创新等方面,以提高监测的精度与时效性。

6.2　成本估算及效益分析　本研究为智慧化集成技术数据平台进行了初步的成本估算。1)设备价格的估算,采用无人机平台(大疆 M300 RTK)及高光谱/多光谱传感器(Micasense RedEdge-MX)时,设备总价约为人民币 20 万元。另多套传感器设备及其安装费用约为人民币 3 ~ 5 万元。2)运营成本估算方面:每年需进行设备维护(尤其在高温高湿环境下,维护成本较高)及数据处理,包括数据采集、存储及分析等环节,预计成本为 10 ~ 20 万元。基于上述成本估算,计算得出智慧化集成技术数据平台初期的投入成本较高,对于小规模的项目,其投资回报率较低。但是对于长期大规模的项目,可采用分阶段投资策略,实现效益最大化,适用于大规模的湿地保护与生态恢复项目。

6.3　未来研究方向　未来研究可从 3 方面深化:一是扩大物种调查范围,开展全岛野生睡莲资源专项普查,明确海南野生睡莲等其他潜在物种的分布情况,并评估其保护状况;二是增强技术集成水平,研发针对睡莲监测的专用传感器与基于卷积神经网络的图像识别算法,实现从“监测”到“预测”的升级;三是加强跨学科融合,结合生态学、计算机科学与遗传学,揭示睡莲濒危的分子机制及生态驱动因素。为了研究环境因子与遗传多

样性之间的关系，采用主成分分析等统计分析方法，探索多个变量之间的相关性，为多源数据融合分析提供理论与数据依据。

7 结论与建议

7.1 主要结论 海南野生睡莲，尤其是延药睡莲，其濒危状态是生境破坏、人为干扰与自身生物学特性共同作用的结果，保护工作具有高度现实紧迫性。本文通过构建以“天空地”立体监测为数据基础、以“数据标准化–融合分析–平台支撑”为核心框架的智慧化数据集成体系，为海南热带雨林国家公园的睡莲属植物保护提供了科学依据。研究表明，该技术框架可系统服务于生态保护与修复、生物多样性监测、濒危物种恢复及气候变化响应等多个管理维度，实现数据驱动的闭环管理。可显著提高湿地生态系统中濒危物种的保护效率。

7.2 政策与实践建议 在技术层面，建议国家公园管理部门增加智慧化监测设备的投入，在睡莲核心分布区布设专用传感网络，安排无人机定期巡飞任务及补充监测；在现有“智慧雨林”平台上增设睡莲专用模块，以实现数据的集中管理与共享；建立技术协作机制，联合科研机构开发睡莲保护专用算法与模型。在管理层面，制定《海南野生睡莲智慧化监测管理办法》，以规范数据采集和应用流程，其主要条款包括以下内容：数据采集与管理上明确监测设备（如遥感卫星、无人机等）的使用规范，设定数据采集的频率标准，以确保数据标准化；此外，建立“科研–管理–社区”协同保护机制，培训当地居民参与移动巡护；将睡莲保护融入国家公园整体保护规划，结合生态搬迁政策，扩大核心生境保护范围。在保障层面，设立野生睡莲保护专项基金，支持监测平台建设与技术研发；加强人才培养，组建兼具生态学与信息技术背景的专业团队；开展公众教育活动，通过自然教育提升社会保护意识，实现生态效益与社会效益的双赢目标。

参考文献：

[1] Dunn B, Ai E, Alger M J, et al. Wetlands insight tool: characterising the surface water and vegetation cover dynamics of individual wetlands using multidecadal Landsat satellite data[J]. Wetlands, 2023, 43(4): 37. https://doi.org/10.1007/s13157-023-01682-7

[2] Soussi A, Zero E, Sacile R, et al. Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review[J]. Sensors, 2024, 24(8): 2647. https://doi.org/10.3390/s24082647

[3] 李亚茹, 云英英, 范秋云, 等. 海南岛野生延药睡莲资源调查研究[J]. 热带作物学报, 2022, 43(7): 1375−1381. https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2022.07.008

[4] 杨军, 何江, 杨媛, 等. 新疆雪白睡莲资源调查与生物学特性研究[J]. 山东林业科技, 2023, 53(4): 36−41. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2724.2023.04.007

[5] Nzei J M, Ngarega B K, Mwanzia V M, et al. Assessment of climate change and land use effects on water lily (*Nymphaea* L.) habitat suitability in South America[J]. Diversity, 2022, 14(10): 830. https://doi.org/10.3390/d14100830

[6] 徐贝洁, 赵悦辰, 刘杰, 等. 维药睡莲花化学成分、药理作用及质量控制研究进展[J]. 中国药事, 2025, 39(9): 1055−1073. https://doi.org/10.16153/j.1002-7777.2025-06-0022

[7] Zhang M, Lin H. Wetland classification using parcel-level ensemble algorithm based on Gaofen-6 multispectral imagery and Sentinel-1 dataset[J]. Journal of Hydrology, 2022, 606: 127462. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127462

[8] Wang C Z. At-sensor radiometric correction of a multispectral camera (RedEdge) for sUAS vegetation mapping[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8224. https://doi.org/10.3390/s21248224

[9] Lin J Y, Tsai H L, Lyu W H. An integrated wireless multi-sensor system for monitoring the water quality of aquaculture[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8179. https://doi.org/10.3390/s21248179

[10] 谢得宝, 周敏, 冯俊, 等. 闸控湖泊水生植物恢复的敏感生态水位研究: 以固城湖为例[J]. 水利水运工程学报2025(3):14−24.https://doi.org/10.12170/20240715001

[11] Kundu S, Kundu B, Rana N K, et al. Wetland degradation and its impacts on livelihoods and sustainable development goals: an overview[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 48: 419−434. https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.024

[12] 夏少霞, 于秀波, 王春晓. 中国湿地生态站现状、发展趋势及空间布局[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7717−7728. https://doi.org/10.5846/stxb202104130960

[13] Pan Y L, Xu X D, Long J P, et al. Change detection of wetland restoration in China’s Sanjiang National Nature Reserve using STANet method based on GF-1 and GF-6 images[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109612. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109612

[14] 李斌, 张爱竹, 孙根云, 等. 基于时序 Sentinel-2 影像的鄱阳湖湿地典型植被群落提取[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(5): 1271−1283. https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2024.5.1271

[15] Slagter B, Tsendbazar N E, Vollrath A, et al. Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: a case study in the St. Lucia wetlands, South Africa[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 86: 102009. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102009

[16] Lausch A, Bannehr L, Berger S A, et al. Monitoring water diversity and water quality with remote sensing and traits[J]. Remote Sensing, 2024, 16(13): 2425. https://doi.org/10.3390/rs16132425

[17] 宫一男, 谭孟雨, 王震, 等. 基于深度学习的红外相机动物影像人工智能识别: 以东北虎豹国家公园为例[J]. 兽类学报, 2019, 39(4): 458−465. https://doi.org/10.16829/j.slxb.150333

[18] Zhang H H, Si Y, Zhao R N, et al. Complete chloroplast genome and phylogenetic relationship of *Nymphaea nouchali* (Nymphaeaceae), a rare species of water lily in China[J]. Gene, 2023, 858: 147139. https://doi.org/10.1016/j.gene.2022.147139

[19] 邵全琴, 刘纪远, 樊江文, 等. 三江源智慧生态畜牧业技术平台建设[Z]. 北京市, 中国科学院地理科学与资源研究所.[2025-10-15].

[20] 孙伟伟, 刘围围, 王煜淼, 等. 2010 年—2022 年全球湿地高光谱遥感研究进展与展望[J]. 遥感学报, 2023, 27(6): 1281−1299. https://doi.org/10.11834/jrs.20232620

[21] 罗菊花, 杨井志成, 段洪涛, 等. 浅水湖泊水生植被遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 68−76. https://doi.org/10.11834/jrs.20221208

[22] McCord S E, Webb N P, Bestelmeyer B T, et al. The Landscape Data Commons: a system for standardizing, accessing, and applying large environmental datasets for agroecosystem research and management[J]. Agricultural & Environmental Letters, 2023, 8(2): e20120. https://doi.org/10.1002/ael2.20120

[23] Himeur Y, Rimal B, Tiwary A, et al. Using artificial intelligence and data fusion for environmental monitoring: a review and future perspectives [J]. Information Fusion, 2022,86−87:44−75.https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.06.003

[24] Guo M, Li J, Sheng C L, et al. A review of wetland remote sensing[J]. Sensors, 2017, 17(4): 777. https://doi.org/10.3390/s17040777

[25] 李意德, 陈洁, 许涵, 等. 稀有物种的调控机制及其在生态修复中的应用启示[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2021, 1(1): 1−11. https://doi.org/10.12356/j.2096-8884.2021-0014

[26] Yu X L, Chen F F, Chen Z Y F, et al. Genetic diversity and gene expression diversity shape the adaptive pattern of the aquatic plant *Batrachium bungei* along an altitudinal gradient on the Qinghai–Tibet plateau[J]. Plant Molecular Biology, 2023, 111(3): 275−290. https://doi.org/10.1007/s11103-022-01326-0

[27] 范存祥, 林志斌, 钟文. 海珠湿地生态监测体系构建[J]. 湿地科学与管理, 2020, 16(2): 61−64. https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3290.2020.02.16

[28] Wang Y W, Gao J, Guo Q C, et al. UAV-based LiDAR and optical imagery fusion for fine-scale classification of aquatic plant associations in lakeshore wetlands[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2025, 8: 1698796. https://doi.org/10.3389/FFGC.2025.1698796

[29] Liu X Q, Li S S. Biodiversity-ecosystem functioning relationship under water level regulation: wetland plant biomass is more strongly related to functional redundancy than functional diversity[J]. Water Biology and Security, 2026, 5(1): 100416. https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100416

[30] Song Y, Gao M, Zhang C P, et al. Variation in soil microbial networks and biogeochemical cycles in the Yalu river Estuary wetland[J]. Annals of Microbiology, 2025, 75(1): 13. https://doi.org/10.1186/s13213-025-01805-x

[31] Chalmers C, Fergus P, Wich S, et al. AI-driven real-time monitoring of ground-nesting birds: a case study on curlew detection using YOLOv10[J]. Remote Sensing, 2025, 17(5): 769. https://doi.org/10.3390/rs17050769

[32] Villa P, Berton A, Bolpagni R, et al. Exploring spectral and phylogenetic diversity links with functional structure of aquatic plant communities[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 318: 114582. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114582

[33] Abdallah A Y A, Albert-Saiz M, Rastogi A, et al. Cloud-based remote sensing for wetland monitoring: a review[J]. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1660. https://doi.org/10.3390/rs15061660

[34] Catry T, Li Z C, Roux E, et al. Wetlands and malaria in the Amazon: guidelines for the use of synthetic aperture radar remote-sensing[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(3): 468. https://doi.org/10.3390/ijerph15030468

Prospects of Intelligent data Integration of wild water lilies in Hainan Tropical Rainforest National Park

Chen Yuchen[1,2#], Zhang Xiaolong[1,2#], Chen Fei[1,2*]

（1. Hainan Institute of National Park, Haikou, Hainan 570203, China;

2. Sanya Nanfan Institute, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China）

Abstract: Hainan, as a core area for biodiversity conservation in China, is home to rare wild water lily resources such as *Nymphaea* spp. The ecological protection and restoration of these species urgently require technological empowerment. Intelligent data integration technologies through multi-source data integration and smart analysis address key issues in the conservation of water lilies in national parks, such as fragmented monitoring and insufficient protection accuracy. A systematical review was made of the status of wild water lily species and the challenges of their conservation in Hainan. It focuses on the application mechanisms of intelligent data integration in habitat monitoring, population dynamics tracking, and climate change response. Furthermore, it analyzes the integrated application modes of cutting-edge technologies, including "sky-earth" integrated monitoring, big data platform construction, and artificial intelligence analysis. By constructing a "sky-earth" integrated monitoring system, the paper achieves precise monitoring and protection of Nymphaea species, providing theoretical references and technological support for advancing the scientific conservation of tropical rainforest wetland ecosystems, the precise restoration of species, and the modernization of management in national parks.

Keywords: Technology of intelligent data integration; Hainan Tropical Rainforest National Park; wild water lilies; biodiversity conservation; Space-Air-Ground monitoring; ecological restoration

(责任编辑:钟云芳)