

引用格式:何廷美,王树锋,吴凡,等.科技赋能生态监测 创新驱动保护发展——以卧龙世界生物圈保护区为例.中国科学院院刊,2025,40(9):1586-1595, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250730001.

He T M, Wang S F, Wu F, et al. Empowering ecological monitoring with science and technology, Driving conservation and development through innovation—A case study of Wolong World Biosphere Reserve. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(9): 1586-1595, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250730001. (in Chinese)

科技赋能生态监测 创新驱动保护发展

——以卧龙世界生物圈保护区为例

何廷美¹ 王树锋^{1*} 吴凡¹ 王永峰²

1 四川卧龙国家级自然保护区管理局 卧龙 623006

2 四川省汶川卧龙特别行政区 卧龙 623006

摘要 生态监测能为生态环境管理与政策制定提供基础数据和决策支撑。四川卧龙国家级自然保护区（以下简称“卧龙自然保护区”）在生态监测方面所采用的技术和方法在全球范围内具有广泛的代表性和影响力。文章在回顾卧龙自然保护区主要监测做法的基础上，介绍了“天空地一体化”监测采用不同技术路径和协同应用，推动一套数据、一个平台、一套算法、一朵云、一张网“五个一”目标的实践，探讨了当前面临的挑战和机遇。一方面存在体制机制限制业务协同、技术标准协同障碍、通信传输与电力供给瓶颈等挑战；另一方面，具有政策支持和发展导向兜底、技术创新与应用拓展、数据价值释放与决策优化等机遇。未来，卧龙自然保护区将通过持续技术创新和跨学科协作，为其他世界生物圈保护区的生态监测提供“中国参考”。

关键词 生物圈保护区，卧龙自然保护区，监测技术，科技赋能，创新驱动

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20250730001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20250730001

生态监测是对生态系统结构、功能及其变化的系统性观测与评估过程^[1]，其目的在于及时发现生态系统的变化趋势和潜在威胁、评估管理成效，从而为政

策制定者提供科学依据^[2]。生态监测在全球环境保护和自然资源管理中至关重要，它也是理解人与自然相互作用、实现联合国2030年可持续发展目标

*通信作者

资助项目：2023年中央财政林业草原生态保护恢复资金（51000024T000011425461）

修改稿收到日期：2025年9月3日

(SDGs)的基础性工具和关键支柱。全球各地的生态监测使用了多种技术和方法。在非洲, Spagnuolo等^[3]将多日期雷达和光学图像、现场数据和航空图像的视觉解释相结合,使用机器学习对肯尼亚马赛马拉国家公园的土地覆盖进行分类监测。北美的黄石国家公园则通过对狼群、食草动物行为和植被恢复的长期实地观察和利用植物结构方法等,揭示了狼群对食草动物行为和植被恢复的连锁生态影响^[4]。在亚马孙热带雨林,研究者采用机载激光雷达(LiDAR)估算森林生物量,并利用森林资源清查测量数据进行校准,发现森林生物量积累随次生林年龄不同而不同^[5]。

四川卧龙国家级自然保护区(以下简称“卧龙自然保护区”)是全球生态监测与濒危物种保护的典范,其在生态监测方面所采用的技术和方法在全球范围内具有广泛的代表性和影响力。例如,卧龙自然保护区采用了包括遥感卫星影像^[6]、全球定位系统(GPS)卫星定位项圈^[7]、人工智能识别系统^[8]、红外相机^[9]在内的一系列现代生态监测工具,用于监测追踪大熊猫及其栖息地的变化。这些技术的应用使卧龙自然保护区不仅实现了对单一旗舰物种的精准管理,也构建了多物种、多尺度的生态系统监控框架。

本文在回顾卧龙世界生物圈保护区生态监测主要做法的基础上,介绍了卧龙自然保护区“天空地一体化”监测体系采用不同的技术路径和不同技术的协同应用,推动一套数据、一个平台、一套算法、一朵云、一张网“五个一”目标的实践,探讨了当前生态监测正从传统的“人工地面调查”向“天空地一体化”监测演进面临的挑战和机遇。一方面存在体制机制限制业务协同、技术标准协同障碍、通信传输与电力供给瓶颈等挑战;另一方面,具有政策支持和发展导向兜底、提升治理与服务效能、技术创新与应用拓展、数据价值释放与决策优化等机遇。未来,卧龙自然保护区将通过持续技术创新和跨学科协作,为其他世界生物圈保护区的生态监测提供“中国参考”。

1 研究区域概况

卧龙自然保护区于1963年设立,位于阿坝藏族羌族自治州汶川县境内,1978年成为国家级自然保护区,保护面积203 448 hm²。1980年卧龙自然保护区首批加入联合国教科文组织(UNESCO)“人与生物圈计划”世界生物圈保护区网络,使卧龙自然保护区成为具有世界意义的保护区。2006年四川大熊猫栖息地被联合国教科文组织列入世界自然遗产名录,卧龙自然保护区是其中最重要的组成部分之一。2021年大熊猫国家公园设立时,卧龙自然保护区2 028.5 km²划入大熊猫国家公园卧龙片区(占原保护区面积的99.7%)(以下简称“卧龙片区”),其中核心保护区面积占92.06%,一般控制区面积占7.94%。卧龙自然保护区内有耿达、卧龙2镇,下辖6个行政村27个村民小组,户籍人口5 000余人,常驻人口6 500余人。区内地理环境独特,海拔垂直高差超过5 000 m,动植物资源富集,有国家重点保护野生动物121种,国家重点保护野生植物69种^[10]。多年来,卧龙自然保护区在大熊猫的保护和繁育中取得了举世瞩目的成就,在国际国内具有重要影响。卧龙自然保护区极具代表性,卧龙片区大熊猫、雪豹“双旗舰”物种的伞护效应具有重要的全球意义。

2 研究方法

卧龙自然保护区在不同时期,根据保护和监测需要选择不同的监测方法,随着技术的发展及保护区工作精细化的要求,生态监测正从传统的“人工地面调查”向“天空地一体化”监测演进。

遥测追踪。1978年卧龙自然保护区与四川省南充师范学校生物系合作,历时10余载,在保护区内牛头山中段海拔2 520 m的“五一棚”建立了世界上第1个大熊猫野外观察站,使用遥测追踪技术在25 km²区域开展了对大熊猫的追踪监测。

森林生态系统定位研究。1994年，始建于1960年的四川米亚罗森林生态系统定位研究站迁入卧龙自然保护区，它是国家林业和草原局森林生态系统定位研究网络站之一。卧龙森林生态系统定位站毗邻邓生保护站，研究区域166.80 km²，森林覆盖率90%以上，地貌以高山峡谷为主。根据不同的植被分布类型，研究站设置了20 m×20 m的固定样地25个，包括四川红杉林3个、红桦林3个、岷江冷杉林8个、岷江冷杉+红桦林3个、高山栎林8个。样地内设置小型气象监测站5个、林内梯度气象监测系统1套、径流观测场5处、观测流堰2处。此外，还建立了1 hm²固定样地3个。依托该站，科研人员长期开展卧龙自然保护区亚高山森林生态系统定位研究。

红外触发相机调查技术。2005年，卧龙自然保护区与北京大学合作首次尝试将红外相机用于大熊猫及其伴生动物的调查。2014—2021年，卧龙自然保护区开始系统化布设公里网格监测，利用红外触发相机开展大中型兽类与鸟类的本底调查，监测相机安装海拔1 470—4 780 m，监测面积约590 km²。2022年，卧龙自然保护区在野外监测体系中引入了实时传输红外相机技术，有效解决了传统相机在数据实时获取和长时稳定供电方面的瓶颈问题。

“天空地一体化”监测体系建设。2022—2025年，卧龙片区实施的四川卧龙大熊猫主要栖息地监测试点项目，整合了卧龙自然保护区前期监测设施（1982—2008年）、香港特别行政区政府援建卧龙自然保护区实施的“数字卧龙”工程（2009—2013年）、国家公园体制试点期间开展的大熊猫国家公园卧龙保护利用设施项目（2017—2021年）。监测试点项目建设内容涵盖了融合通信、感知设施、机房设施、监测应用四大板块等共计10个子项，按照“一套数据、一个平台、一套算法、一朵云、一张网”进行部署，在卧龙片区初步搭建了“天空地一体化”监测体系。

3 结果与分析

生态监测是生态环境保护与管理的核心支撑手段，技术路径的实现伴随科技的进步而发展，巡护员的日常巡护、技术人员的样方调查、研究人员的样线调查、现场采样、生态定位研究等，这些主要依靠人工实地调查，辅以仪器设备测量、记录。随着科学技术的发展，人工地面调查正被智能生态监测技术部分替代，在特定条件下已被完全替代，人转变为扮演验证的角色。但这些技术各有优势，通常需要组合应用才能实现全面、全域的监测，促进生态环境监测与保护目标的达成。

3.1 遥测追踪开创野生大熊猫研究先河

20世纪80年代，“五一棚”作为世界上首个大熊猫野外观察站，胡锦矗（中国）和乔治·夏勒（美国）任组长，共同率领中外科学家团队在方圆25 km²的区域联合开展大熊猫的遥测追踪和7条样线调查，开创了观察和研究野生大熊猫的先河。1985年，胡锦矗和乔治·夏勒等联合编著的《卧龙的大熊猫》^[10]，首次揭秘了野生大熊猫在密林里的生活，是大熊猫保护科研的权威基础资料，也是大熊猫保护研究事业的起点，为后续的研究和保护工作奠定了坚实基础，具有深远的历史意义。

3.2 森林生态定位站监测开启亚高山森林生态系统研究

1995年以来，四川省林业科学研究院依托卧龙森林生态系统定位研究站（以下简称“卧龙定位研究站”），与卧龙自然保护区等单位合作，长期开展了川西亚高山森林生态系统结构、功能与服务，亚高山森林植被对气候变化的响应与适应机制，川西亚高山生物多样性保护与可持续利用途径等研究。2017年开始，按照国家林业和草原局科技司生态定位站网的要求，严格进行了水文、土壤、气象和植被的数据汇交。此外，卧龙定位研究站还与中国林业科学研究院

森林生态环境与保护研究所、北京林业大学、四川大学、四川农业大学、成都理工大学、电子科技大学等高校和科研院所开展科研合作交流，联合培养研究生10余名，发表SCI收录研究论文10余篇^[12-14]。未来，卧龙定位研究站需要借助融合通信、大数据、云计算，进行数据的采集、传输、存储及分析研究，并协同整合更广泛的信息资源，在更大的范围内共享运用数据资源和信息，形成吸引国内外科学家参与、多学科交叉研究的基础营地。

3.3 红外相机调查技术用于双旗舰物种监测

2005年，卧龙自然保护区开始应用红外相机调查技术。2009年，在卧龙自然保护区魏家沟首次拍摄到雪豹的影像。2014—2024年，红外触发相机调查技术、实时传输技术在卧龙广泛应用于大熊猫、雪豹及同域动物监测^[15-21]。2020年，在海拔1 800—4 200 m的40 km²区域部署实时传输红外相机，2021年3月，实时传输红外相机记录了卧龙白色大熊猫影像，使科研人员能够在第一时间获取大熊猫等重点物种的关键监测数据，结合环境及时取样，实现DNA信息提取与分析同步开展。同时，依托连续、实时的数据流，研究人员能够在特定时间段内掌握大熊猫的活动轨迹与活动范围。2024年，红外相机调查技术用于大熊猫、雪豹“双旗舰”物种网格化监测，当年红外相机总有效工作日57 482天，获取兽类、鸟类照片和视频124 428份，有效探测数17 618次。鉴定出35种野生兽类和42种野生鸟类，其中不乏国家重点保护野生动物。进一步分析发现，在35个位点拍摄到673份大熊猫照片和视频，主要在老鸦山、仓旺沟、中河区域；在50个位点拍摄2 454份雪豹照片和视频，集中在木香坡和磋磨至火把沟区域。上述数据的获得是传统人工追踪痕迹难以获取的，监测数据不断刷新大熊猫等旗舰物种的遇见率、物种种类，也记录了新分布和新物种^[22,23]，更新了卧龙片区的本底基础数据。

3.4 “天空地一体化”监测体系构建

卧龙自然保护区早期监测工作（1982—2008年）主要是气象、水文监测，对于野生大熊猫的监测采用颈圈式微型收发报仪和卫星定位仪跟踪，而圈养大熊猫通过模拟视频监控进行监控。2008年“5.12汶川特大地震”后，香港特别行政区政府以援建卧龙自然保护区为契机，实施了“数字卧龙”建设工程（2009—2013年），建成了10处机房、8个语音塔，26路网络监控，300 km的骨干光纤联通了“五一棚”野外观察站、中国保护大熊猫研究中心（现为“中国大熊猫保护研究中心”）的卧龙核桃坪基地、都江堰大观基地、雅安碧峰峡基地。国家公园体制试点期间（2017—2021年），卧龙自然保护区实施的文化旅游提升项目——大熊猫国家公园保护利用设施建设项目在数字卧龙的基础上新增光纤通信70 km、卫星应急地面站2处，短波通信基站4个、超短波红外相机接收基站4个、高清视频监控达到476路、野外布设传统红外相机500余台、实时触发红外相机80台、显示大屏3处，保护站之间建成网络视频会议系统，整合了部分数字卧龙信息化平台，初步构建了大熊猫国家公园卧龙数字平台，形成了“卧龙之窗”“卧龙脉搏”“卧龙与您”三大业务体系：平台实现了办公自动化（OA）、森林防火、道路卡口、巡护监测等功能，获取了超60万张（段）野生动物图片和视频，这些监测设施在科研、保护和管理方面发挥了一定作用，但也存在缺乏系统规划、兼容性差，数据质量不高、覆盖范围小、数据“烟囱”、平台利用率低、协同效应差、运维费用高等缺陷。

2022—2025年，卧龙依托四川卧龙大熊猫主要栖息地监测试点项目，采用不同的技术路径、不同技术的协同应用，构建了卧龙片区“天空地一体化”监测体系，推动一套数据、一个平台、一套算法、一朵云、一张网“五个一”目标的实践，促进智能化监测。卧龙生态监测“五个一”具体指：“一套数据”

即数据标准化建设，在统一数据标准的基础上对各项基础数据进行采集、清洗、存储，形成标准化数据并向应用平台开放；“一个平台”即统一规范的业务应用平台，由数字孪生应用、智慧监测应用、物联网管理平台、数据集成平台四大模块构成，在实现设备、数据的可视化管理的同时满足实时监测、分区管控、预警处置、宣传教育及日常巡护等多场景应用；“一套算法”即人工智能（AI）识别及预测算法，根据卧龙监测工作特征和资源情况，形成一套不断学习、不断完善的影像及声音识别算法，并逐渐形成预测能力；“一朵云”即云基础设施，采用公有云及私有云结合的方式管理及发布计算、存储资源，按照业务实际需求提供服务能力；“一张网”即融合通信网，融合了 700 MHz 5G 通信、卫星通信、微波传输、超短波、光纤通信、数字集群、无线网状网络（Mesh）自组网等多种通信技术，用于满足野外通信及感知设施数据传输。

感知设施建设方面：“天基”采用了四季遥感影像和卫星传输数据；“空基”配置了集红外、可见光、偏振光、激光测距为一体的吊舱及多旋翼无人机；“地基”感知由实时红外触发相机、防火云台、监控探头、北斗颈圈、碳通量塔、树径测量仪、气象水文记录等终端组成。规范后的机房能够提供安全可靠的传输存储及计算环境。

4 “天空地一体化”监测建设探讨

数字林草建设的核心是运用新一代信息技术，实现林草治理体系和治理能力现代化，推动林草事业高质量发展。通过完善生态感知体系，如以云计算、物联网、移动互联、大数据、人工智能等技术支撑构建“天空地一体化”的监测网络，实现对林草资源、生态灾害等的实时监控和动态监测，促进实体经济和数字经济深度融合，提升林草产业的数字化和自动化水平。以生态大数据中心为基础，构

建智慧化的管理服务新模式，推动信息技术与林草政务深度融合。同时，以“数据中台”为核心，整合多源数据，实现林草资源的“一张图”管理、全周期监管和智能化决策，从而提高林草资源监管效率，加强生态保护修复能力，激发林草产业发展新动能。

卧龙片区以多种技术融合建设的“一张网”，形成的“天空地一体化”监测网络，在海拔 1 200—6 250 m 的垂直带谱上监测旗舰物种的栖息地面积超过 30%。系统建设整合了卧龙现有监测设备和系统成果，旨在加强大熊猫国家公园自然生态系统的完整性和原真性保护，也是对一张网、一朵云、一套数据、一套算法、一个平台“五个一”建设目标具体路径的探索。卧龙片区在大熊猫国家公园监测体系建设方案（2025—2027 年）“1+3+N”监测总体架构中属于“N”层级（“1”指 1 个国家级数据中心，“3”指 3 个省级数据中心，“N”代表多个分局、保护站数据节点）。在没有可借鉴模式下，力求构建监测总体架构中数据节点“N”的数据采集、传输、存储、分析和应用服务，不可避免存在一定的局限性。伴随科技的快速进步，林草精细化管理的要求，当前生态监测正从“人工地面调查”逐渐向“天空地一体化”监测演进。“天空地一体化”监测体系的“五个一”建设目标是从“物理建设”到“逻辑协同”再到“价值释放”的系统工程，缺一不可，共同支撑数字化转型的落地，当前面临诸多挑战与机遇。

4.1 挑战方面

（1）体制机制限制业务协同。“条块分割、各自为政”的体制机制常导致信息化建设缺乏全局性思考和系统性考量，影响顶层设计和统筹建设，导致重复建设、盲目建设和重建设轻管理。基础数据整合需要融通多个方面，涉及层面广，统筹难度大，制度上的刚性约束和资源上的协同不足，导致业务协作难，难以充分发挥“一个平台”的协同效应。需要从体制机制

入手解决管理上的“条块分割”，推动跨部门、跨层级、跨区域业务协同。

(2) **技术标准协同障碍**。当前“天空地一体化”监测体系涵盖天基遥感卫星、空基无人机与激光雷达、地基物联网传感器等多类手段，设备和平台来源分散，缺乏统一的数据标准和接口规范。不同厂商设备在数据格式、通信协议、接口方式上差异明显，导致数据流通不畅、共享困难，跨系统联动效率低下，难以形成真正意义上的“一张网”，整体监测与管控效能受到削弱。需要建立统一的数据模型和接口标准，推动设备与平台的标准化接入；通过适配层或中间件实现跨厂商、跨系统的互联互通。

(3) **通信传输与电力供给瓶颈**。LoRaWAN、NB-IoT等物联网网络虽具备远距离覆盖优势，但受限于带宽，难以支撑高清视频与大容量数据回传；微波通信具备高带宽能力，却易受山体阻隔，需要依赖高架中继站，建设与运维成本高、难度大。受此制约，系统难以兼顾实时性与覆盖范围。需要构建多层次通信架构，形成“微波骨干+Mesh自组网+低功耗物联网+卫星通信”的混合网络；采用事件触发与分级传输机制，确保关键事件实时上传，同时通过分时补传方式完成全量数据回传。电力供给瓶颈表现为山区监测点多依赖风光互补供电，但在雨雪、大雾等恶劣天气下，光伏入射衰减、风速不稳，供电能力显著下降，难以长期支撑高功耗设备运行，直接制约了实时监测与大数据回传能力，易造成设备掉线或性能下降，影响系统稳定性。需要优化能源配置，采用“太阳能+风能+储能电池+能量管理”的综合方案；前端设备推广低功耗设计与事件触发策略，结合储能扩容与智能调度，提升极端气候条件下的能源保障能力。

(4) **野外设施建设高难度**。大熊猫国家公园所处地理环境独特，山高谷深，监测网络建设面临覆盖不全面、代表性不足、工程施工困难等诸多挑战，野外设施建设难度高。以卧龙片区为例，施工窗口期极

短，在高海拔（2 700—4 800 m）建设通信塔及配套设施建设遭遇了复杂地理、地质和恶劣气象条件的影响，无路、无电、无网，高山峡谷地形、恶劣天气等因素导致设备设施运输困难，施工安全隐患剧增，建设抗8级地震的野外基站、设备承受-30℃—60℃温差、超远距离徒步运维、核心区建设办理行政许可困难等均是野外施工的难点痛点。

(5) **“一套数据”的多维瓶颈**。① **受制于数据采集和数据标准，数据采集困难，信息系统多且数据异构、多源分散，数据壁垒严重**。不同传感器产生的结构化与非结构化数据（包括可见光影像、红外热成像、声纹数据等）存在时空基准不统一问题。② **数据管理缺乏统一标准**。数据质量参差不齐，接口标准不统一，复用性差，导致数据难以有效整合和共享，价值难以充分挖掘。③ **AI算法准确度不足**。数据融合分析能力有待提升，实时共享不及时，不能完全满足工作决策需要。现行监测框架下，卧龙片区监测系统每天产生大量原始数据，包括定位轨迹坐标、无人机航迹数据、影像数据等时空数据，且具有多光谱/高光谱影像序列，微气象站记录的多维特征向量等环境参数数据，这些数据的初始标注需要动物学和植物学的专家参与，存在专业人力成本高的问题。④ **外部环境与安全挑战**。当前网络安全风险呈现全球化趋势，国产替代和密级定级保护需要较大资金投入，伴随数据的集中和共享，网络安全风险增加，数据泄露、网络攻击等问题威胁着“一套数据”“一朵云”“一张网”“一个平台”的安全。

4.2 机遇方面

(1) **政策支持和发展导向兜底**。国家高度重视数字中国建设，出台了一系列政策文件。例如，2023年2月，中共中央、国务院印发《数字中国建设整体布局规划》，为信息化建设提供了明确的发展方向和政策支持；2024年12月《中华人民共和国生态环境监测条例（草案征求意见稿）》公开征求意见，这将为构

建统一、权威、高效的生态环境监测体系提供法治保障。虽然提高了行业准入门槛，但也有助于规范行业发展，引导行业向高质量转型。数字中国的建设将推动中国生态监测体系全面智能化升级，有利于“五个一”目标的实现。

(2) 提升治理与服务效能。“一个平台”“一张网”的建设是推进治理现代化和服务高效化的重要路径，其核心逻辑是通过打破分散、孤立的传统模式，实现资源整合、数据贯通和流程协同，从而系统性提升治理能力与服务质量，提升服务的便捷性、普惠性和满意度。降低制度性交易成本，为公众提供更便捷、高效的服务。“一个平台”是“智慧内核”，解决“数据通、业务通”的问题；“一张网”是“连接载体”，解决“服务广、响应快”的问题。二者协同发力，最终实现治理更精细、服务更便捷、群众更满意的目标，是数字时代推进国家治理体系和治理能力现代化的关键抓手。

(3) 技术创新与应用拓展。大数据、云计算、区块链、物联网及人工智能等前沿技术的快速发展与应用，为“一套算法”“一朵云”等建设提供了强大的技术支撑。例如，新一代CNN+Transformer混合架构在物种识别中表现突出，大熊猫物种识别准确率（Accuracy）达98.7%（测试集 $n=15\ 792$ 张图像），支持17种同域物种并行检测，可识别啃食痕迹、足迹链等间接证据。再者，基于大模型的行业AI能力生成与应用，能够提升创新能力和行业服务，让林草行业生产效率和服务体验同步提升。

(4) 促进产业发展与生态构建。信息化建设的“五个一”目标能够吸引众多科技企业参与，带动上下游产业集聚，形成健康有序的产业发展生态。例如，广州数字政府建设中的“五统一”（统一政务云、统一安全运营、统一基础运维、统一数据资源、统一项目管理）改革建设吸引了大量网络安全和数据行业企业参与，促进了信息技术（IT）运维产业价值和品

牌价值提升，值得林草行业“五个一”工程建设借鉴。

(5) 数据价值释放与决策优化。“一套数据”的集中管理和整合，有利于打破数据孤岛，充分释放数据价值，将海量、分散、无序的数据，转化为具有指导意义的洞察、规律或预测，解决“数据孤岛”“信息冗余”等问题。技术层面通过数据采集、清洗、存储、建模（如机器学习、统计分析）等，挖掘数据中隐藏的关联、趋势或异常。业务层面将技术挖掘的结果与具体场景结合，让数据从“纸上分析”变成“可行动的信息”。“把数据变成能用的智慧”“用智慧把事情做得更好”，二者共同推动从“经验驱动”到“数据驱动”的升级，充分释放数据价值，实现科学决策，提升林草行业的管理水平和竞争力。

5 结论与展望

总的来看，卧龙世界生物圈保护区与全球其他地区的生态监测既有共性，如依赖高科技与多源数据融合；也有差异，表现为卧龙特色，如高海拔梯度、监测目标呈现双旗舰物种保护特征。卧龙的生态监测具有多机构多专业协同、多种先进技术融合、多物种多尺度监测的显著特色。①其国家主导、大学、科研机构、企业深度参与的长期合作机制，使得监测具有高度系统性与连续性，远超过许多以短期项目为主的发展中国家保护区^[24]。②卧龙新建的“天空地一体化”监测体系是一张融合多种先进技术的“专网”。③卧龙在“双旗舰”物种（大熊猫、雪豹）为核心的生态系统管理模式，推动了监测系统从“物种导向”向“生态系统导向”的过渡，将使卧龙片区生态监测趋于更高效、更智能。

展望未来，卧龙世界生物圈保护区可以从其他一些先进技术、全球监测网络、综合概念框架和“1+3+N”监测总体架构中受益。例如，环境DNA（eDNA）作为一种非侵入式监测工具，已在水生及陆地生态系

统中高效检测生物种群和群落结构^[25]。面对全球生态危机如生物多样性丧失的挑战,科学家正推动建立一个类似全球气象网的“全球生物多样性观测系统”(GBIOS),以提升数据可比性、不同区域间的技术共享与监测网络互联并加速生态行动^[26]。应用全程耦合框架^[27],可为解决人类与自然耦合系统的综合性问题提供科学工具。机载边缘计算可以完成目标初检(动物/人员/车辆/火点),只回传事件切片与热异常点,常规影像批量回传至中心;平台完成自动拼接与时空索引,结合栅格网格/样带基线生成个体/群体活动热区图、通行路径迁移图与昼夜活动节律曲线,并与地面红外相机/视频监控进行多源交叉验证;利用无人机的倾斜摄影和三维建模功能,周期性开展航线飞行,实现高效获取高分辨率影像数据,并生成真实、精准的三维模型和正射影像。对比分析不同时期的模型数据,识别林地变化、道路建设、设施分布、滑坡隐患等动态要素,实现对监测区域的动态更新和精细化管理。未来的生态监测不仅可以监测卧龙内部的变化,还可以监测影响卧龙的相邻和远处系统的变化。随着大熊猫国家公园“自然保护智能体”的成熟,其技术范式可复制到其他保护区。卧龙世界生物圈保护区一方面将受益于新的生态监测方法,另一方面将继续塑造全球生态监测的未来。

参考文献

- 1 Spellerberg I. Monitoring Ecological Change (2nd edition). Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- 2 Lindenmayer D B, Likens G E. The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation*, 2010, 143 (6): 1317-1328.
- 3 Spagnuolo O S B, Jarvey J C, Battaglia M J, et al. Mapping Kenyan grassland heights across large spatial scales with combined optical and radar satellite imagery. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1086.
- 4 Ripple W J, Beschta R L. Trophic cascades in Yellowstone: The first 15 years after wolf reintroduction. *Biological Conservation*, 2012, 145: 205-213.
- 5 da Silva G M, Adami M, Galbraith D, et al. Spatial distribution of secondary forests by age group and biomass accumulation in the Brazilian Amazon. *Forests*, 2023, 14 (5): 924.
- 6 Liu J G, Linderman M, Ouyang Z Y, et al. Ecological degradation in protected areas: The case of Wolong nature reserve for giant pandas. *Science*, 2001, 292: 98-101.
- 7 Hull V, Zhang J D, Zhou S Q, et al. Space use by endangered giant pandas. *Journal of Mammalogy*, 2015, 96(1): 230-236.
- 8 Hou J, He Y X, Yang H B, et al. Identification of animal individuals using deep learning: A case study of giant panda. *Biological Conservation*, 2020, 242: 108414.
- 9 Li Z Y, Tang Z, Xu Y J, et al. Habitat use and activity patterns of mammals and birds in relation to temperature and vegetation cover in the alpine ecosystem of southwestern China with camera-trapping monitoring. *Animals*, 2021, 11 (12): 3377.
- 10 何廷美, 段造刚, 何可, 等. 卧龙生物多样性保护的理论与实践. 北京: 科学出版社, 2024.
He T M, Duan Z G, He K, et al. *Wolong Biodiversity Conservation: Theory and Practice*. Beijing: Science Press, 2024. (in Chinese)
- 11 胡锦矗, 乔治·夏勒, 等. 卧龙的大熊猫. 成都: 四川科学技术出版社, 1985.
Hu J C, Schaller G B, et al. *Giant Pandas of Wolong*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press. (in Chinese)
- 12 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等. 巴郎山刺叶高山栎叶片 $\delta^{13}C$ 对海拔高度的响应. *生态学报*, 2011, 31(13): 3629-3637.
Feng Q H, Cheng R M, Shi Z M, et al. Response of foliar $\delta^{13}C$ of *Quercus spinosa* to altitudinal gradients. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3629-3637. (in Chinese)
- 13 何茜, 冯秋红, 张佩佩, 等. 基于叶片和土壤酶化学计量的川西亚高山岷江冷杉林养分限制海拔变化规律. *植物生态学报*, 2023, 47(12): 1646-1657.
He X, Feng Q H, Zhang P P, et al. Altitudinal patterns of nutrient limiting characteristics of *Abies fargesii* var.

- faxoniana forest based on leaf and soil enzyme stoichiometry in western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(12): 1646-1657. (in Chinese)
- 14 Wang L X, Deng D Z, Feng Q H, et al. Changes in litter input exert divergent effects on the soil microbial community and function in stands of different densities. *Science of the Total Environment*, 2022, 845: 157297.
- 15 张晋东, 李玉杰, 黄金燕, 等. 利用红外相机建立野生水鹿行为谱及PAE编码系统. *兽类学报*, 2018, 38(1): 1-11.
Zhang J D, Li Y J, Huang J Y, et al. Behavior coding and ethogram of the sambar (*Rusa unicolor*) in field environment. *Acta Theriologica Sinica*, 2018, 38(1): 1-11. (in Chinese)
- 16 唐卓, 杨建, 刘雪华, 等. 利用红外相机研究卧龙国家级自然保护区绿尾虹雉的活动规律. *四川动物*, 2017, 36 (5): 582-587.
Tang Z, Yang J, Liu X H, et al. Activity pattern of Chinese monal (*Lophophorus lhuysii*) in Wolong National Nature Reserve revealed by camera - trapping. *Sichuan Journal of Zoology*, 2017, 36(5): 582-587. (in Chinese)
- 17 唐卓, 杨建, 刘雪华, 等. 基于红外相机技术对四川卧龙国家级自然保护区雪豹(*Panthera uncia*)的研究. *生物多样性*, 2017, 25(1): 62-70.
Tang Z, Yang J, Liu X H, et al. Research on snow leopards (*Panthera uncia*) using camera-trapping in Wolong National Nature Reserve, China. *Biodiversity Science*, 2017, 25(1): 62-70. (in Chinese)
- 18 施小刚, 胡强, 李佳琦, 等. 利用红外相机调查四川卧龙国家级自然保护区鸟兽多样性. *生物多样性*, 2017, 25 (10): 1131-1136.
Shi X G, Hu Q, Li J Q, et al. 2017. Camera-trapping surveys of the mammal and bird diversity in Wolong national nature reserve, Sichuan Province. *Biodiversity Science*, 2017, 25 (10): 1131-1136. (in Chinese)
- 19 施小刚, 史晓昀, 胡强, 等. 四川邛崃山脉雪豹与赤狐时空生态位关系. *兽类学报*, 2021, 41(2): 115-127.
Shi X G, Shi X Y, Hu Q, et al. Spatiotemporal relationships between snow leopard (*Panthera uncia*) and red fox (*Vulpes vulpes*) in Qionglai Mountains, Sichuan Province. *Acta Theriologica Sinica*, 2021, 41(2): 115-127. (in Chinese)
- 20 胡强, 林红强, 戴强, 等. 卧龙自然保护区三种中型食肉动物的生态位差异. *动物学杂志*, 2020, 55(6): 685-691.
Hu Q, Lin H Q, Dai Q, et al. Niche differentiation among three middle-sized carnivores in Wolong Nature Reserve. *Chinese Journal of Zoology*, 2020, 55(6): 685-691. (in Chinese)
- 21 金森龙, 瞿春茂, 施小刚, 等. 卧龙国家级自然保护区食肉动物多样性及部分物种的食性分析. *野生动物学报*, 2021, 42(4): 958-964.
Jin S L, Qu C M, Shi X G, et al. The species diversity and diet of some carnivores in Wolong National Nature Reserve, Sichuan Province. *Journal of Wildlife*, 2021, 42(4): 958-964. (in Chinese)
- 22 何飞, 刘兴良, 刘世荣, 等. 卧龙自然保护区种子植物新记录. *四川林业科技*, 2010, 31(5): 79-82.
He F, Liu X L, Liu S R, et al. 2010. New recorded seed plants in Wolong Nature Reserve. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2010, 31(5): 79-82. (in Chinese)
- 23 程跃红, 刘桂英, 李文静, 等. 四川省兰科植物一新记录种——齿突羊耳蒜. *四川林业科技*, 2023, 44(3): 153-155.
Cheng Y H, Liu G Y, Li W J, et al. *Liparis rostrata*, a newly recorded species of Orchidaceae in Sichuan Province. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2023, 44(3): 153-155. (in Chinese)
- 24 Liu J G, Hull V, Yang W, et al. *Pandas and People: Coupling Human and Natural Systems for Sustainability*. Oxford: Oxford University Press, 2016.
- 25 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *A Vision for Continental-Scale Biology: Research Across Multiple Scales*. Washington DC: The National Academies Press, 2025.
- 26 Gonzalez A, Vihervaara P, Balvanera P, et al. A global biodiversity observing system to unite monitoring and guide action. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7(12): 1947-1952.
- 27 Liu J G. Leveraging the metacoupling framework for sustainability science and global sustainable development. *National Science Review*, 2023, 10(7): nwad090.

Empowering ecological monitoring with science and technology, Driving conservation and development through innovation

—A case study of Wolong World Biosphere Reserve

HE Tingmei¹ WANG Shufeng^{1*} WU Fan¹ WANG Yongfeng²

(1 Sichuan Wolong National Nature Reserve Administration, Wolong 623006, China;

2 Sichuan Wenchuan Wolong Special Administrative Region, Wolong 623006, China)

Abstract Ecological monitoring can provide basic data and decision-making support for ecological environment management and policy formulation. The technologies and methods adopted in ecological monitoring by the Wolong National Nature Reserve, located in Sichuan, China, hold extensive representativeness and influence on a global scale. Based on a review of the main monitoring practices of the Wolong World Biosphere Reserve, this paper presents the adoption of different technical paths and collaborative applications in the “sky-Earth-space integrated” monitoring, as well as the practices in promoting the “Five Ones” goals (i.e., one set of data, one platform, one set of algorithms, one cloud, and one network). The current challenges and opportunities are also explored. On the one hand, there are challenges such as institutional and mechanism restrictions on business collaboration, obstacles to the coordination of technical standards, and bottlenecks in communication transmission and power supply; on the other hand, there are opportunities including policy support and development-oriented guarantees, improvement of governance and service efficiency, technological innovation and application expansion, and data value release and decision optimization. In the future, through continuous technological innovation and interdisciplinary collaboration, Wolong will provide Chinese reference for ecological monitoring in other world biosphere reserves.

Keywords biosphere reserve, Wolong National Nature Reserve, monitoring technology, technology empowerment, innovation driver

何廷美 四川卧龙国家级自然保护区管理局原副局长,教授级高级工程师。主要研究领域:保护生物学、保护地管理、保护区信息化。E-mail:248109505@qq.com

HE Tingmei Former Deputy Director of the Sichuan Wolong National Nature Reserve Administration, Professor-level Senior Engineer. His main research fields cover conservation biology, protected area management, and informatization of protected areas. E-mail: 248109505@qq.com

王树锋 四川卧龙国家级自然保护区管理局高级工程师。主要研究领域:保护区管理、保护区信息化。E-mail:114723847@qq.com

WANG Shufeng Senior Engineer of Sichuan Wolong National Nature Reserve Administration. His main research fields include protected area management and informatization of protected areas. E-mail: 114723847@qq.com

■责任编辑:张帆

*Corresponding author