

天空地一体化大数据在野生动物监测领域的应用思考

陈飞, 杨子诚, 王梦君, 赵明旭, 王智红

(国家林业和草原局亚洲象研究中心, 国家林业和草原局昆明勘察设计院 昆明 650031)

摘要: 野生动物是生态保护的重要类群, 是研究与管理的主要对象。随着技术的发展, 愈来愈多的技术手段被用于野生动物监测。通过对传统监测技术与当前主流监测技术的总结梳理, 讨论现今监测手段存在的不足; 并基于天空地一体化技术在各个领域的运用, 以云南野生亚洲象监测为例, 思考天空地一体化大数据在野生动物监测领域的应用, 为今后野生动物监测技术发展提供新视角。

关键词: 天空地一体化; 野生动物监测; 红外相机技术; 样线法; 亚洲象

Consideration on the application of space-sky-terrestrial integrated big data in the field of wildlife monitoring

CHEN Fei, YANG Zicheng, WANG Mengjun, ZHAO mingxu, WANG Zhihong

(Asian Elephant Research Center of State Forestry and Grassland Administration,

Kunming Survey & Design Institute of State Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031, China)

Abstract: Wildlife is an important group of ecological protection and the main object of research and management. With the development of technology, more and more techniques are being used to monitor wildlife. This article collated and summarized the traditional monitoring technology and the current mainstream monitoring technology, discuss the shortcomings of current monitoring methods. Based on the application of space-sky-terrestrial technology in various fields, taking yunnan wild Asian elephant monitoring as an example, considers the application of space-sky-terrestrial integrated big data in the field of wildlife monitoring and provides a new perspective for the development of wildlife monitoring technology in the future.

Keyword: Space-sky-terrestrial integrated; wildlife monitoring; camera-trapping technology; line transect methods; Asian elephant

野生动物是生态保护的重要类群, 常被作为监测的重点对象, 监测通常针对野生动物的种群数量、栖息地状况、疫源疫病、环境影响等方面。通过监测野生动物, 有利于我们了解野生动物的种群动态、能够获取栖息地必要信息、掌握野生动物资源现状, 从而进行影响评估、优化管理策略, 达到保护野生动物及其栖息生境等目的。野生动物监测内容可概括为对珍稀濒危物种、旗舰物种、指示物种、外来入侵物种等的物种监测; 对种群结构、大小与密度、

种群动态等的种群监测; 以及对野生动物遗传多样性方面的监测^[1]。野生动物监测早期大多采用样线调查、样方调查、定点计数、问卷调查等传统技术^[2]。随着科技的发展, 红外相机技术、无人机遥感技术、无线电追踪技术等智能化、自动化的野生动物监测技术陆续崭露头角, 成为野生动物监测的重要技术手段。

智能化、自动化的技术减少了监测工作对人工的依赖、降低了对生物及栖息地的直接影响^[3],

收稿日期: 2021-03-12

作者简介: 陈飞, 男, 高级工程师, 主要从事动物生态研究。

基金项目: 国家林草局科研项目“基于亚洲象及其栖息地监测的天空地一体化大数据应用技术研究”。

使野外监测工作更加便利。尽管如此,这些技术在实际运用中仍然存在一定局限性。红外相机技术需要精心的管理维护,影像数据鉴定存在局限,图像质量与清晰度难以把控^[4];无线电追踪技术常伴随巨额开销,且样本量小、总体水平推断差,还过分强调精细数据的重要性^[5]。事实说明,采用单一技术进行野生动物监测工作往往不够全面。要解决这一技术问题,首先可通过技术发展开发全新监测技术,或通过使用多种技术进行监测,以此弥补各技术存在的短板。因此,基于地面监测、空域监测和卫星遥感的“天、空、地”技术融合一体化监测逐步兴起。随着大数据时代的来临,天空地一体化的运用愈加广泛,多重技术协同运作达到全面监测逐步在各个领域中实现,成为未来发展的新方向^[6,7]。通过对传统监测技术与当前主流监测技术的梳理、结合现今监测手段存在的不足与其他领域天空地一体化运用的基础,思考天空地一体化大数据在野生动物监测领域的应用,为今后野生动物监测技术发展提供新视角。

1. 野生动物监测技术

1.1 传统监测技术

传统监测技术指那些发展时期较早、主要依靠人力调查的野生动物监测技术,包括样线调查技术、样点调查技术、标记重捕技术等。

样线调查技术,是最常见的野生动物调查方法之一。调查者以一定的速度沿着样线前进,同时记录样线两侧一定距离内监测对象的种类及数量。该技术应用面很广,覆盖鸟兽、两爬以及昆虫,多被用于生物多样性评估与物种数量估计^[8-13]。样点调查技术要求调查者以相同时间停留在固定间距的位点上,记录一定范围内监测对象种类和数量,是森林鸟类监测的方法之一,常与样线技术协同使用,也常被进行比较,可用于估计鸟类多样性及种群密度等^[14-16]。标记重捕技术是在一定区域内对目标物种进行捕捉、标记、放生,过段时间后再捕捉,通过重捕个体数量估算种群密度的技术,常用于水生生物、啮齿目等物种种群密度的估计^[17-19]。

1.2 主流监测技术

现阶段对野生动物的监测主要以更加便利的技术为主,包括最常用于物种监测的红外相机技术、无人机遥感技术与无线电追踪技术等。

红外相机技术是指基于红外感应设备,摄像设

备在无人操控条件下自动拍摄进入视框中的野生动物照片及视频的技术^[20]。早期被用于物种数量的估计,并在个体识别、相对丰富度和种群密度估算等监测方面突出显示强大优势^[21-24]。无人机遥感技术是无人机与遥感技术的结合,以无人飞行器为载体,搭载遥感传感器实现影像视频等数据的获取。对野生动物的监测主要被运用于物种数量的调查与行为的观测等^[25-28]。无线电追踪技术依靠安装于动物身上的发射器获取无线电信息从而达到追踪动物的目的^[29]。包括了甚高频(VHF)无线电跟踪^[30]、Argos 卫星跟踪^[31,32]以及全球定位系统(GPS)跟踪^[33]。该技术可监控并绘制动物运动的细节,为研究野生动物提供了前所未有的洞察力。

1.3 存在的优势与局限

监测技术的发展无疑使野生动物监测更加便利、智能,也打开了更多探索的大门。能够监测小型哺乳动物、鸟类、海洋生物乃至昆虫^[34],能够克服恶劣环境^[35],支持区域生物资源的调查,掌握区域生物资源情况的同时还可判断区域生境是否仍然保有完整的哺乳动物群落^[36,37];便于稀有物种个体识别、种群大小与密度的估计^[36,38]、生物多样性的研究^[39-45]和物种的长期监测^[46,47],还可用于研究物种行为及活动模式^[48-53]、栖息地选择、种群动态以及部分种间关系^[54-57]等。为掌握野生动物空间分布、资源利用、种群数量、活动模式等方面提供了大量影像数据。在支持科研工作的同时海量数据也为管理部门的科学管理与决策提供了数据基础。

但技术仍存在有局限性,传统技术对人力需求较高的同时对人员专业水平也有要求,容易受到一些主观因素的影响。而后期运用广泛的监测技术也没有那么精准^[58-60],也存在过高估计种群数量^[61]、错误触发损耗电量及内存^[62]、较高投入导致迫使研究设计变弱^[63,64]以及对动物的负面影响^[65,66]等。除此之外,任何技术在运用中,都首先需要符合监测对象的特性;其次要合乎抽样原则,否则会对研究造成严重偏差^[67]。

由此可见,对野生动物监测技术选择的关键是依据监测对象特性、贴合监测内容,在符合科学抽样与统计学分析的基础上合理选择技术手段。

2. 天空地一体化技术

天空地一体化技术指运用多种监测手段,从

“天”“空”“地”三域实现对监测目标的多维度监测,旨在解决单一手段监测不全面及信息反馈不及时等问题。同时产生卫星和航拍等空天领域监测影像以及地面调查采集的各类数据,合称天空地一体化大数据^[68]。

2.1 天空地一体化在各领域中的应用

随着技术的发展、大数据时代的来临,天空地一体化技术已被用于各个领域。利用遥感卫星监测、无人机监测和地面传感器实时监测构建天空地一体化尾矿库监测预警方法,实现实时动态监测预警^[69];基于互联网+、遥感技术、GIS等形成天空地一体化环水保监控系统,实现对环水保全过程精细化管控^[70];将现场地面监测、小微型无人机数字化地形建模、卫星大尺度遥感影像相结合,形成天空地一体化水土保持监测^[71];将天空地一体化技术应用于河湖水域岸线监管^[72];通过天空地一体化技术获取重大危险源现状数据并应用于综合风险管理^[73];利用天地空一体化形成环境空气监测网络等^[74]。

天空地一体化技术也被运用于保护区的监管。广西雅长兰科植物国家级自然保护区强化巡护巡检系统、无人机、林火资源视频监控系统等的应用,初步实现天地空一体化监控森林资源^[75];广西防城金花茶国家级自然保护区基于遥感影像、无人机航摄与移动核查技术,构建了天地一体化自然保护区人类活动监管系统,提高了自然保护区监管时效性,有效解决了监管盲区^[76];与此同时,国家重大科技项目“祁连山自然保护区生态环境评估、预警与监控关键技术研究”获批立项,旨在研发生态环境监控的关键技术,构建天空地一体化监控体系^[77]。由此可见,利用天空地一体化技术实现监测对象的全面、实时监测已成为大数据时代背景下研究监测的大趋势和重要方向。

2.2 天空地一体化大数据的优劣

监测结合红外相机技术、或再与GIS技术等手段都是为了通过技术互补实现更全面的监测,例如针对东北虎豹、其他猫科动物的红外相机监测网络与平台^[78,79],或是三江源红外相机社区监测平台^[80]等,这些技术融合都增加了监测手段的便利性、长效性与适应性。天空地一体化大数据同样具有该优势,同时覆盖“天”“空”“地”三域的监测特点使得监测更加全面,也极大的增加了对各类监测对象的适应性,如依托无人机、卫星导航和野外巡护等技术和手段,形成“空、天、地”

一体化资源监控系统,实现西藏雅鲁藏布大峡谷国家级自然保护区内资源监测和生物多样性的智慧监控^[81]。

大数据分析则是该技术的第二优势。在监测手段愈加便利的当代,各类技术已为野生动物监测带来了海量数据。这使得快捷智能的数据管理和分析成为监测工作的关键。天空地一体化技术能够通过信息集成与处理技术实现对多源信息的获取、处理与分析,最终实现动态监测、查询统计、综合管理等多种功能^[82]。

而该技术存在的应用限制主要来源于网络信号与投入成本。多源监测前段与强大后台系统的搭建必然需要较高的投入成本,而要实现实时监测还会受到监测区域网络信号的限制。因此该技术在现今野生动物监测领域中的应用并不频繁。

可以明确的是单一监测技术存在的局限性使得技术融合、弥补不足成为野生动物监测领域的必然发展,对于多源数据的智能管理分析也极其重要^[3]。正如物联网技术被运用于野生动物监测一般^[83,84],天空地一体化监测涉及的技术集成和大数据应用也应该在野生动物监测中进行尝试。

3. 应用思考及发展方向

亚洲象作为我国旗舰物种,保护管理问题一直备受关注,同时,人象活动区域重叠带来的诸多问题也亟需缓解。因此以监测野生亚洲象为例,思考应用国内外亚洲象及其栖息地监测技术进行集成、利用大数据应用技术构建亚洲象天空地一体化监测体系,探讨天空地一体化大数据能够解决的实际监测问题,为野生动物监测技术未来发展提供新方向。

3.1 “天”“空”“地”监测概念及内容

栖息地破碎化、质量下降等问题使亚洲象进行迁徙以寻找适宜栖息地,进而导致人象活动区域的重叠、造成人象冲突^[85,86]。这使得亚洲象栖息地的研究与保护成为科学缓解人象冲突的关键,而目前亚洲象分布区域变化情况不直观,亚洲象行为改变原因分析较弱等现状成为保护管理的短板。因此设计“天”域监测作为研究支撑。“天”即栖息地卫星遥感监测,获取高分辨率遥感卫星影像,通过空间分析、对比分析等方法监测亚洲象分布重要区域的土地利用、植被覆盖、人类活动、生态环境等方面的变化情况,反映区域生态系统情况,为生态环境监测、自然资源资产调查和人类活动监察执法

等工作提供依据,也为探讨生境变化与亚洲象分布、行为等变化相互关系提供基础数据。

为缓解人象冲突而采取的系列措施均需要长期观察以验证其可行性,而亚洲象物种特性导致观察研究危险性高,多在夜间活动的行为规律也限制了人为观察^[87]。因此为了科学分析缓解措施可行性与补充夜间观测的能力,同时保障人员安全,设计“空”域监测作为观察支持。“空”即全自主无人机监测。在亚洲象重要活动区域,配备全自主无人机智能巡护监测系统,对地面进行定期与不定期巡护和监测,及时掌握任意时段某一象群的个体数量、种群结构及活动状况,人象冲突事件以及分布区内人类干扰状况等。无人机定期自主巡查助力亚洲象采食偏好、取食季节性变化的方面研究;支持收集种群结构信息;无人机也是处理紧急冲突事件的必要辅助技术。

现阶段亚洲象监测主要依靠人员跟踪、红外相机、无人机等监测手段,为获取亚洲象种群信息、活动信息,开展区域预警提供重要支撑。在此基础上构建地面监测网络,能够更好助力数据管理与分析工作,加强区域联动与信息交流,提升保护管理工作效率,因此设计“地”域监测,以构建监测网络。“地”即地面监测,包括红外触发相机监测、智能生态视频监控、亚洲象个体跟踪监测以及野外跟踪巡护监测。通过构建地面视频监控网络,获得亚洲象影像数据并实现实时传输,再基于深度学习技术,实现对海量视频监测数据的视频浓缩和摘要,检索关键信息,提升视频数据成果的积累效率;采用亚洲象活动跟踪,掌握亚洲象个体的活动轨迹、活动时间等的活动规律,采取适宜的应对措施,实现区域有效预警,同时叠加区域植被类型与其生境要素等生态资源信息,为研究分析亚洲象种群扩散原因、扩散模型、活动规律提供重要数据支撑。

针对亚洲象及其栖息地监测所尝试运用的“天”“空”“地”监测技术,均通过亚洲象监测经验总结、结合地方监测特点及国际监测水平,综合设计而成。集成各项技术构建野生亚洲象监测网络,真正实现亚洲象及其栖息地的“天空地一体化”监测。

3.2 亚洲象监测大数据管理平台构建

3.2.1 设计思路

基于“天”“空”“地”三域监测前端设备即可搭建亚洲象“天空地一体化”监测体系。而为了保障所获海量数据的筛选、管理、整合与分析等工

作能够有序进行,则需构建稳定、安全、高效地数据管理平台,即亚洲象监测大数据管理平台。

为满足亚洲象监测数据管理、存储、筛选及分析等的需求,平台构建需根据前端设备针对性设计各类系统,并要充分考虑亚洲象及其栖息地保护研究现状,全面融合亚洲象基础信息与其分布区域监测信息,切实满足亚洲象研究保护的业务需求与管理需求,以实现亚洲象监测、栖息地研究分析以及各项数据的生命周期管理。据此设计综合监测大数据信息资源库、红外相机监测数据管理系统、生态影像智能分析系统、野外智能巡护监测管理系统、亚洲象科研监测一张图系统、遥感数据应用系统以及科研监测数据库共享平台等系统。

3.2.2 系统构成与功能

综合监测大数据信息资源库是基于前端监测体系所获得的相关数据,进行分类和整理创建而成的数据库,主要为数据的存储、管理和应用奠定基础。

红外相机监测数据管理系统是针对当前正在运行与今后将要布设的红外相机而设计的监测数据管理系统,具有图像智能识别、分类自动存储与数据统计分析的功能,可自动接收红外相机传回的实时监测数据,同时支持自动导入存储卡数据并进行规范管理。并采用图像智能识别、深度学习和云计算等先进技术进行图像数据智能识别,快速智能筛选,提高图片判读与物种鉴定效率,以此提升保护管理能力。

生态影像智能分析系统以汇聚红外相机、监控视频、无人机等多种手段获取的影像数据为基础,通过结合实时监测、智能分析、后端 GIS 地图联动等多项功能来实现对海量生态影像数据的综合智能化管理与应用。可做到动态目标智能观测,活动动物有效识别、背景分离、实时跟踪,可为物候观测、动物种类辨别、个体识别、行为识别、群体行为分析等提供关键数据。

野外智能巡护监测管理系统能够实现规范化和多元化的巡护及监测信息采集,实现巡护人员的动态管理与巡护情况及亚洲象活动情况的及时掌握,能够提高巡护工作的信息化和科学化水平、科学记录与存储巡护数据信息,为巡护工作及亚洲象保护工作的开展提供数据支撑。

亚洲象科研监测一张图系统以便利监测人员掌握亚洲象分布区内自然资源、生态环境、亚洲象及共栖物种活动状况等数据为目的,应用多源数据融合及空间分析等技术手段而建立。能够实现对亚

洲象分布区域的全方位一体化监测和科学智能化分析,将常规监测数据、多媒体影像数据、气象、土壤等多源海量数据进行整合,对亚洲象分布区内的自然资源、亚洲象及其他动物、跟踪巡护等多种数据进行在线监测,时刻反映分布区真实情况。

遥感数据应用系统通过对土地资源多时相的卫星数据进行处理,得到各时相监测区土地利用分类现状;基于多源卫星遥感数据,对亚洲象分布区域内的生态环境进行遥感监测;借助巡护移动终端,结合野外智能巡护监测管理系统,将遥感应用于巡护监测,以支撑亚洲象活动区域资源环境管理、巡护等需求。

科研监测数据库共享平台为促进亚洲象相关的科研活动的顺利开展而建立,将获取到的亚洲象及其栖息地各类科研监测数据进行分类、清洗、规范化等处理后,向相关政府部门和科研机构通过接口的方式开放共享,提高平台数据的效益,充分发挥亚洲象研究共享价值。

3.3 问题解决

天空地一体化大数据在野生亚洲象监测上的运用思考,包括了前端监测设备集成与后接平台的设计。前者主要依据野生亚洲象种群数量较少、分布区狭窄而零散、适宜栖息地破碎化、人象冲突严峻,且采用人力跟踪、红外相机布点、部分区域无人机监测的散布监测现状进行技术选择,包括用于林中监测的红外相机、关键居民点的视频监控、人力亚洲象种群跟踪监测、全球卫星定位、应急处理和食源地自主监控的无人机以及亚洲象分布区域卫星影像数据来实现亚洲象及其栖息地的全面监测与预警。为了实现实时监控、数据智能储存、信息快速传输等亚洲象监测需求,还必须设计对应于前端设备的管理系统与展示平台。在这一层面的设计上,结合大数据分析,充分发挥智能识别技术,大大减少数据识别工作量,减少数据筛选、整理过程中的人力消耗;同时在简单播放监控画面的基础上实现监测视频、设备信息、工作情况等监测显示。

野生动物监测工作不仅仅是监测野生动物,有时还是促进区域和谐发展的重要手段。在技术发展的加持下监测工作变得便利、高效,也愈加智能;不同技术的融合,迸发出无限的可能,将天空地一体化大数据运用于野生亚洲象的监测工作,将是一场全新的野生动物监测体验。我们相信,通过这样的应用思考,能为未来野生动物监测工作提供新的视角。

参考文献:

- [1] 林英华,肖文发. 野生动物监测现状与展望 [A]. 中国动物学会兽类学分会、中国生态学会动物生态专业委员会、中国野生动物保护协会. 野生动物生态与资源保护第三届全国学术研讨会论文摘要集 [C]. 中国动物学会兽类学分会、中国生态学会动物生态专业委员会、中国野生动物保护协会: 中国动物学会, 2006: 1.
- [2] 郜二虎,梁兵宽,宋岩梅,等. 国内外野生动物监测 [J]. 林业资源管理, 2001, (03): 27-30.
- [3] 肖文宏,周青松,朱朝东,等. 野生动物监测技术和方法应用进展与展望 [J]. 植物生态学报, 2020, 44 (04): 409-417.
- [4] 张履冰,崔绍朋,黄元骏,等. 红外相机技术在我国野生动物监测中的应用: 问题与限制 [J]. 生物多样性, 2014, 22 (06): 696-703.
- [5] Hebblewhite M, Haydon DT. Distinguishing technology from biology: a critical review of the use of GPS telemetry data in ecology [J]. Philos Trans R Soc Lond B BiolSci, 2010, 365 (1550): 2303-2312.
- [6] 李晟,王大军,肖治术,等. 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景 [J]. 生物多样性, 2014, 22 (06): 685-695.
- [7] Karanth K U. Estimating tiger *Panthera tigris* populations from camera-trap data using capture-recapture models [J]. Biological Conservation, 1995, 3 (71): 333-338.
- [8] 许龙,张正旺,丁长青. 样线法在鸟类数量调查中的运用 [J]. 生态学杂志, 2003, (05): 127-130.
- [9] 艾孜孜江·乃比,夏米西丁·阿不都热依木,热木图拉·阿卜杜克热木,等. 艾比湖国家级湿地自然保护区鹤喉羚种群数量与分布 [J]. 四川动物, 2015, 34 (03): 447-452.
- [10] 龚大洁,黄荣通,刘开明,等. 基于样线法的康县隆肛蛙 (*P. kangxianensis*) 种群数量及栖息地现状研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32 (05): 144-148.
- [11] 吴兵,初雯雯,甄荣,等. 新疆布尔根河狸国家级自然保护区两栖和爬行动物多样性 [J]. 四川动物, 2017, 36 (04): 468-473.
- [12] 曹龙,王香,翟卿,等. 尧山自然保护区蝴蝶群落多样性的研究 [J]. 河南农业大学学报, 2019,

- 53(05): 752-758.
- [13] 杨丽红, 郑发科. 四川小寨子沟自然保护区地表甲虫多样性 [J]. 四川动物, 2007, (04): 733-737.
- [14] 吴飞, 杨晓君. 样点法在森林鸟类调查中的运用 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2240-2244.
- [15] 文雪, 严勇, 和梅香, 等. 2 种调查方法对四川黑竹沟国家级自然保护区 3 种雉类种群密度调查的比较 [J]. 四川动物, 2020, 39(01): 68-74.
- [16] 蔡音亭, 干晓静, 马志军. 鸟类调查的样线法和样点法比较: 以崇明东滩春季盐沼鸟类调查为例 [J]. 生物多样性, 2010, 18(01): 44-49.
- [17] 金刚. 用标志重捕法估算湖泊二龄河蟹种群数量 [J]. 水生生物学报, 1999, (02): 194-196.
- [18] 吴鹏飞, 曾宗永, 王跃招, 等. 青海沙蜥种群密度调查的一种新方法 [J]. 生态学杂志, 2005, (10): 1241-1244.
- [19] 张旭, 鲍毅新, 刘军, 等. 陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法 [J]. 生态学报, 2012, 32(05): 1562-1569.
- [20] 李晟, 王大军, 肖治术, 等. 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景 [J]. 生物多样性, 2014, 22(06): 685-695.
- [21] Karanth K U. Estimating tiger *Panthera tigris* populations from camera-trap data using capture-recapture models [J]. *Biological Conservation*, 1995, 3(71): 333-338.
- [22] Karanth K U, Nichols J D. Estimation of tiger densities in India using photographic captures and recaptures [J]. *Ecology*, 1998, 8(79): 2852-2862.
- [23] Wallace R B, Gomez H, Ayala G, et al. Camera trapping for jaguar (*Panthera onca*) in the Tuichi valley, Bolivia [J]. *Mastozoologia Neotropical / Journal of Neotropical Mammalogy*, 2003, 1(10): 133-139.
- [24] Jo D, Stephen H. The challenges of recognising individuals with few distinguishing features: Identifying red foxes *Vulpes vulpes* from camera-trap photos [J]. *PLoS one*, 2019, 14(5): e0216531.
- [25] 胡健波, 张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展 [J]. 生态学报, 2018, 38(01): 20-30.
- [26] 高娟婷, 孙飞达, 霍霏, 等. 无人机遥感技术在草地动植物调查监测中的应用与评价 [J]. 草地学报, 2021, 29(01): 1-9.
- [27] 邵全琴, 郭兴健, 李愈哲, 等. 无人机遥感的大型野生食草动物种群数量及分布规律研究 [J]. 遥感学报, 2018, 22(03): 497-507.
- [28] 吴方明, 朱伟伟, 吴炳方, 等. 三江源大型食草动物数量无人机自动监测方法 [J]. 兽类学报, 2019, 39(04): 450-457.
- [29] Scott RW, Kenneth HP, Christine MB. Analysis of Survival Data from Radiotelemetry Studies [J]. *Radio Tracking and Animal Populations*, 2001, 14: 351-380.
- [30] Fisher KE, Adelman JS, Bradbury SP. Employing Very High Frequency (VHF) Radio Telemetry to Recreate Monarch Butterfly Flight Paths [J]. *Environ Entomol*, 2020, 49(2): 312-323.
- [31] Sims DW, Queiroz N, Humphries NE, et al. Long-term GPS tracking of ocean sunfish *Mola mola* offers a new direction in fish monitoring [J]. *PLoS One*, 2009, 4(10): e7351.
- [32] Hoenner X, Whiting SD, Hindell MA, et al. Enhancing the use of Argos satellite data for home range and long distance migration studies of marine animals [J]. *PLoS One*, 2012, 7(7): e40713.
- [33] Sánchez-Giraldo C, Daza JM. Getting better temporal and spatial ecology data for threatened species: using lightweight GPS devices for small primate monitoring in the northern Andes of Colombia [J]. *Primates*, 2019, 60(1): 93-102.
- [34] Daniel Kissling W, Pattemore D E, Hagen M. Challenges and prospects in the telemetry of insects [J]. *Biol Rev Camb Philos Soc*, 2014, 89(3): 511-530.
- [35] Tomkiewicz SM, Fuller MR, Kie JG, et al. Global positioning system and associated technologies in animal behaviour and ecological research [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2010, 365(1550): 2163-2176.
- [36] 杨纬和, 陈月龙, 邓玥, 等. 利用红外相机对四川白水河国家级自然保护区鸟兽资源的初步调查 [J]. 生物多样性, 2019, 27(09): 1012-1015.
- [37] Ninon F V M, Helen J E, Ricardo M, et al. An assessment of the terrestrial mammal

- communities in forests of Central Panama, using camera-trap surveys [J]. *Journal for Nature Conservation*, 2015, 26: 28-35.
- [38] 杨子诚, 陈颖, 李俊松, 等. 基于红外相机技术对亚洲象个体识别和种群数量的评估 [J]. *兽类学报*, 2018, 38(01): 18-27.
- [39] 李伟东, 胡凯津, 曾毅龙, 等. 利用红外相机对深圳野生兽类和鸟类多样性的调查 [J]. *兽类学报*, 2019, 39(05): 565-574.
- [40] 尚晓彤, 罗春平, 李斌, 等. 四川王朗国家级自然保护区鸟类多样性与区系组成 [J]. *四川动物*, 2020, 39(01): 93-106.
- [41] 李佳灵, 周铜磊, 黄翔, 等. 海南五指山国家级自然保护区鸟兽多样性研究 [J]. *野生动物学报*, 2019, 40(04): 924-932.
- [42] 莫锦华, 李佳, 刘芳, 等. 利用红外相机调查海南尖峰岭地区兽类和鸟类多样性 [J]. *林业科学*, 2019, 55(10): 203-210.
- [43] 林开森, 徐建国, 李文周, 等. 福建省戴云山野生哺乳动物和鸟类红外相机监测 [J]. *生物多样性*, 2018, 26(12): 1332-1337.
- [44] 李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 等. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性 [J]. *生物多样性*, 2018, 26(12): 1343-1347.
- [45] 潘丹, 吴炳贤, 张冰, 等. 武陵源世界自然遗产地兽类和鸟类多样性的红外相机初步监测 [J]. *兽类学报*, 2019, 39(02): 209-217.
- [46] Ronny S, Cathrine S T, Dean W J, et al. Plastic mistaken for prey by a colony-breeding Eleonora's falcon (*Falco eleonora*) in the Mediterranean Sea, revealed by camera-trap [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 106(1-2): 200-201.
- [47] 王方, 姚冲学, 张志中, 等. 云南哀牢山凤头鹰繁殖记录 [J]. *动物学杂志*, 2018, 53(05): 700-768.
- [48] 罗欢, 肖雪, 李玉杰, 等. 利用红外相机建立川金丝猴的行为谱及PAE编码系统 [J]. *四川动物*, 2019, 38(06): 646-656.
- [49] 张龙, 邓玥, 钟雪, 等. 基于红外相机技术的川金丝猴地面活动监测 [J]. *三峡生态环境监测*, 2019, 4(03): 68-73.
- [50] 武鹏峰, 刘雪华, 蔡琼, 等. 红外相机技术在陕西观音山自然保护区兽类监测研究中的应用 [J]. *兽类学报*, 2012, 32(01): 67-71.
- [51] 张晋东, 李玉杰, 李仁贵. 红外相机技术在珍稀兽类活动模式研究中的应用 [J]. *四川动物*, 2015, 34(05): 671-676.
- [52] 王志淦, 李言阔, 钟毅峰, 等. 基于红外相机的白鹇集群模式与活动节律研究 [J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(06): 592-597.
- [53] 刘宇, 缪华, 蒋桂莲, 等. 云南古林箐省级自然保护区四种哺乳动物日活动节律及活动模式分析 [J]. *野生动物学报*, 2019, 40(04): 832-839.
- [54] Montgomery RA, Redilla KM, Ortiz-Calo W, et al. Evaluating the individuality of animal-habitat relationships [J]. *Ecol Evol*, 2018, 8(22): 10893-10901.
- [55] Cagnacci F, Boitani L, Powell RA, et al. Animal ecology meets GPS-based radiotelemetry: a perfect storm of opportunities and challenges [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2010, 365(1550): 2157-2162.
- [56] Isbell LA, Bidner LR, Crofoot MC, et al. GPS-identified, low-level nocturnal activity of vervets (*Chlorocebus pygerythrus*) and olive baboons (*Papio anubis*) in Laikipia, Kenya [J]. *Am J Phys Anthropol*, 2017, 164(1): 203-211.
- [57] Isbell LA, Bidner LR, Van Cleave EK, et al. GPS-identified vulnerabilities of savannah-woodland primates to leopard predation and their implications for early hominins [J]. *J Hum Evol*, 2018, 118: 1-13.
- [58] Frair JL, Fieberg J, Hebblewhite M, et al. Resolving issues of imprecise and habitat-biased locations in ecological analyses using GPS telemetry data [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2010, 365(1550): 2187-2200.
- [59] de Weerd N, van Langevelde F, van Oeveren H, et al. Deriving Animal Behaviour from High-Frequency GPS: Tracking Cows in Open and Forested Habitat [J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0129030.
- [60] Silva R, Afán I, Gil JA, et al. Seasonal and circadian biases in bird tracking with solar GPS-tags [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0185344.
- [61] Johansson Ö, Samelius G, Wikberg E, et al. Identification errors in camera-trap studies

- result in systematic population overestimation [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):6393.
- [62] Hobbs M T, Brehme C S. An improved camera trap for amphibians, reptiles, small mammals, and large invertebrates [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0185026.
- [63] Miller CS, Hebblewhite M, Goodrich JM, et al. Review of research methodologies for tigers: telemetry [J]. *Integr Zool*, 2010, 5(4): 378-389.
- [64] Hebblewhite M, Haydon D T. Distinguishing technology from biology: a critical review of the use of GPS telemetry data in ecology [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2010, 365(1550): 2303-2312.
- [65] Meek PD, Ballard GA, Fleming PJ, et al. Camera traps can be heard and seen by animals [J]. *PLoS One*, 2014, 9(10):e110832.
- [66] Balmori A. Radiotelemetry and wildlife: Highlighting a gap in the knowledge on radiofrequency radiation effects [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 543(Pt A):662-669.
- [67] Kolowski JM, Forrester TD. Camera trap placement and the potential for bias due to trails and other features [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10):e0186679.
- [68] 张文英, 耿秋实, 张雪莹, 等. 天空地一体化大数据在社会安全领域的应用 [J]. *电脑知识与技术*, 2018, 14(10): 55-57.
- [69] 高小盼, 张志学, 宋金蕊, 等. 天空地一体化技术在尾矿库监测预警中的应用 [J]. *金属矿山*, 2020(02): 188-193.
- [70] 赵国仲, 李培民, 杨正河, 等. 空天地一体化环保监控在青海电网基建智慧管理中的研究与实践 [J]. *科学技术创新*, 2020(26): 123-125.
- [71] 蔡志洲, 袁普金, 王森. 空天地一体化水土保持监测初探 [J]. *人民黄河*, 2018, 40(04): 92-95.
- [72] 桑国庆, 鲁晓喆, 曹方晶, 等. 基于“空天地一体化”河湖水域岸线遥感监管模式 [J]. *中国水利*, 2020, (20): 76-78.
- [73] 唐尧, 王立娟, 刘欢, 等. 基于“天空地”一体化的重大危险源安全防控系统建设与应用 [J]. *国土资源信息化*, 2019, (03): 41-45.
- [74] 曾燕君, 梁桂雄, 刘叶新, 等. 广州市天地空一体化环境空气质量监测网络的建设 [J]. *环境监测管理*与技术, 2012, 24(05):1-4.
- [75] 秦伟志. 雅长保护区天地空一体监控 [J]. *广西林业*, 2019, (01):29.
- [76] 杨海菊, 闭馨月. 广西典型自然保护区监管天地一体化技术应用探究 [J]. *环境监测管理*与技术, 2020, 32(03):59-62.
- [77] 甘肃科技本刊讯. 国家重大科技项目“祁连山自然保护区生态环境评估、预警与监控关键技术研究”获批立项 [J]. *甘肃科技*, 2020, 36(03):3.
- [78] 王天明, 冯利民, 杨海涛, 等. 东北虎豹生物多样性红外相机监测平台概述 [J]. *生物多样性*, 2020, 28(09):1059-1066.
- [79] 刘炎林, 宋大昭, 刘蓓蓓, 等. 中国猫科动物红外相机监测平台介绍: 民间环保机构的数据整合 [J]. *生物多样性*, 2020, 28(09):1067-1074.
- [80] 贾丁, 李沛芸, 赵翔, 等. 三江源红外相机社区监测平台概述 [J]. *生物多样性*, 2020, 28(09):1104-1109.
- [81] 王梦犀. 基于“智慧保护区”的资源监控系统案例应用研究 [J]. *林业调查规划*, 2020, 45(04):72-78+82.
- [82] 唐尧, 王立娟, 刘欢, 等. 基于“天空地”一体化的重大危险源安全防控系统建设与应用 [J]. *国土资源信息化*, 2019, (03):41-45.
- [83] 贾璐瑞. 基于物联网技术的野生动物监测系统 [J]. *信息记录材料*, 2020, 21(04): 175-176.
- [84] 房祥玲, 周兴策, 钟恩主, 等. 基于物联网技术的野生动物生态学监测——以大紫胸鹦鹉和西黑冠长臂猿为例 [J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(03): 100-108.
- [85] 熊云翔. 对西双版纳野生亚洲象保护问题的探讨 [J]. *中国生物圈保护区*, 1996, (03): 27-29.
- [86] 许再富. 亚洲象与竹/蕉分布隔离的生态效果及其保护对策探讨 [J]. *生态学杂志*, 2004, (04): 131-134.
- [87] 关磊, 王云, 陈兵, 等. 思小高速公路野象谷路段亚洲象活动规律 [J]. *交通运输研究*, 2020, 6(04): 52-59.