

红外相机技术在我国野生动物监测中的应用： 问题与限制

张履冰^{1,2} 崔绍朋^{1,2} 黄元骏^{1,2} 陈代强^{1,2} 乔慧捷¹ 李春旺¹ 蒋志刚^{1*}

1 (中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学重点实验室, 北京 100101)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 红外相机(camera traps)作为对野生动物进行“非损伤”性采样的技术, 已成为研究动物多样性、种群生态学及行为学的常用手段之一。其发展和普及为中国野生动物多样性和物种保育研究带来了诸多机会。如今, 国内大多数自然保护区都在运用红外相机技术开展物种监测工作。本文结合20年来已发表的相关研究, 从内容、实验设计以及发展趋势方面, 总结了目前红外相机技术在应用过程中出现的共性问题; 并就相机对动物的干扰性、影像识别、研究的适用范围及安全保障四个方面, 对该项技术在实践中存在的限制进行了探讨。最后结合红外相机技术未来的发展方向, 提出了建立技术规范、数据集成和共享、影像数据版权维护、提高监测效率等问题。

关键词: 红外相机技术, 野生动物监测, 多样性, 种群, 自然保护区

Infrared camera traps in wildlife research and monitoring in China: issues and insights

Lvbing Zhang^{1,2}, Shaopeng Cui^{1,2}, Yuanjun Huang^{1,2}, Daiqiang Chen^{1,2}, Huijie Qiao¹, Chunwang Li¹, Zhigang Jiang^{1*}

1 Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Infrared-triggered camera (camera trap) is a “non-invasive” method for detecting or recording wild animals, and is a useful tool for studying animal diversity, population ecology and animal behavior. The development of infrared camera traps facilitates contemporary biodiversity research and conservation efforts in China. In addition to researchers, most Chinese nature reserves are using camera traps to monitor animals. Based on publications from the past two decades, we summarized common issues related to research content, experimental design, and trends in infrared camera usage. We also discuss the drawbacks and limitations of infrared cameras in terms of disturbance to animals, image identification, and scope of application and security of the cameras in the field. Finally, we provide direction for the future establishment of monitoring protocols, data integration and sharing, and improving monitoring efficiency in using camera traps.

Key words: infrared triggered camera, camera trap, wild animal monitoring, biodiversity, population, nature reserve

红外相机(camera traps, camera trapping)作为一种“非损伤性”的物种调查和记录技术, 20世纪90年代开始应用于野生动物研究。与传统手段相比, 该技术具有对动物干扰小(Brackman, 2000; Wegge *et al.*, 2004; Schipper, 2007)、能捕获难以发现的物种

(Trolle & Kéry, 2003; Carbone *et al.*, 2006)、影像资料便于存档检索等优点(O’Connell *et al.*, 2011), 已成为调查物种多样性、估算动物种群密度、研究栖息地选择以及记录动物行为模式的常用手段。红外相机技术发展之初, 我国的研究者们就已结合珍稀

收稿日期: 2014-10-23; 接受日期: 2014-11-23

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2013FY110300)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jiangzg@ioz.ac.cn

野生动物的科研和保护工作开展了一些早期实践,如东北虎(*Panthera tigris altaica*, 李志兴, 2003)、大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*, 卢学理等, 2005)、雪豹(*Panthera uncia*, 马鸣等, 2006)等。但由于当时相机成本高昂,该技术并没有得到迅速推广。近5年来,随着数码技术的迅速发展,红外相机在造价下降的同时性能亦获得大幅提高,促进了其应用在全国范围内的普及。目前,除了科研人员,我国大多数自然保护区也都在运用红外相机开展各类型的物种监测工作。下文将针对国内红外相机研究现存的问题,以及该技术在实际应用中的一些限制进行说明并展开讨论。

1 红外相机使用中存在哪些共性的问题?

经过近20年的研究积累,红外相机技术在我国野生动物监测研究中取得了许多进展。同时,一些限制其发展的问題也逐渐显露出来。我们对中国知网(CNKI)中文期刊数据库、中国期刊网全文数据库以及Web of ScienceTM期刊论文数据库中收录的国内相关学术论文进行了检索,检索条件为:主题,或论文题目,或摘要,或关键词中含有“红外相机”、“camera trap”、“camera traps”或“camera-trapping”以及“China”的生物学期刊论文。本文选择了其中以红外相机监测为主要研究内容或手段的中、英文文献49篇,探索了该项研究在内容、方案设计和形势上存在的问题。

1.1 研究内容畸重畸轻

目前国内已发表的与红外相机技术相关的学术论文,其内容基本包括以下方面:(1)野生动物本底资源及动物多样性调查,这部分内容约占39%,基本模式为“在某地开展红外相机监测,获得了哪些物种的影像资料”。其中,一些研究运用物种累积曲线探讨了红外相机的抽样效果,对该地区的后续工作进行了铺垫(刘芳等, 2012; 章书声等, 2012);另外一些将监测结果与当地的自然环境特征、人类活动强度等结合讨论,探索了影响动物多样性的潜在因素(王云等, 2013);还有一些研究仅是对研究区域的生物多样性指数进行简单的比较和讨论,仍停留在“监测报告”的阶段(陈小荣等, 2013; 胡天华和李元刚, 2013; 郑伟成等, 2014)。(2)动物行为学研究,约占23%。比如,对某一动物类群活动节律的监测(章书声等, 2012; 刘东志等, 2013; 赵玉泽等,

2013; 李峰和蒋志刚, 2014),以及关于动物特定行为的探索(薛亚东等, 2014; 王佳佳等, 2014; 李敏等, 2014)。研究者可从照片或视频片段中提取行为的类型、发生的时间等信息,计算研究对象的活动强度指数(relative activity index, RAI)并评估其活动水平(activity level, Rowcliffe *et al.*, 2014)。与多样性调查相比,行为学研究中投入的相机数量较少,但对照片信息的提取和处理要求更高,该类内容在发表数量上明显少于多样性监测研究。(3)估算种群数量和分布。该类内容的文献并不多(如Li *et al.*, 2010; 章书声等, 2013; 李治霖等, 2014),约占21%。尽管目前有多种软件(Efford *et al.*, 2010; Hines, 2010; Gopalswamy, 2012)可以分析相机所得的数据,大大简化了种群参数估计的过程,该类研究仍需较长时间的数据积累以提高估计的准确性,特别是对于一些迁移性、种群密度低或生活史周期长的物种。(4)方法类。文献也比较少(如章书声等, 2012; Si *et al.*, 2014),约占17%。目前,国内研究在实验设计上大都参考O'Brien等(2003, 2010)、Rovero等(2014)和O'Connell等(2011)学者的方案(肖治术等, 2014b),对于相机布设、信息提取和数据集成(肖治术等, 2014a)等关键问题,仍基于前人结论开展,缺乏独立探索。

1.2 缺乏关于抽样方案的探讨

红外相机监测的抽样方案基于研究目标而生,根据实际情况而定。蒋志刚(2004)曾经指出,在设计行为学实验时,应当考虑3个关键问题:随机化、重复性和对照实验。前两个要素关系到样本的代表性及是否能进行统计学分析,对于红外相机监测的实验设计同样重要。虽然红外相机监测难以实现真正的随机化抽样,但应尽量通过“穿插分散”的方式提高样本代表性,并在上述过程中保证每个相机位点数据的统计独立性,防止“伪重复抽样”。若开展梯度比较类型的研究,如对比不同强度的干扰对动物的影响、不同程度的资源投入对某种或某类动物的保护效果等,一定要设置对样地。若监测物种多样性,还应注意每个相机位点的数据在时间和空间上的自相关问题,并尽量保证数据的连续性以及抽样强度的可比性。建议研究者制定抽样方案时,结合研究目标、研究区域本底以及其他相关资料,基于预实验的结果设置抽样方式和强度,切勿直接照搬他人的实验设计。

红外相机监测时的抽样强度指标主要有监测时长(捕获日)和抽样面积2个参数。在物种多样性调查中,一般将物种积累曲线(species accumulation curve, SAC)趋于平缓作为达到足够抽样强度的指示。就捕获日而言:尽管所在的生境类型及研究区域面积各不相同,国内大部分物种多样性监测的投入都在1,000–3,000个捕获日之间,只有4项研究投入了10,000捕获日以上(图1a)。在我国大部分监测样地,投入2,000个捕获日左右的监测时长,是否已经足够进行可信的统计推断?不同生境中,延长或缩短监测时长会对推断的准确性产生何种影响?以上都是需要进一步探索的问题。从结论中提到抽样面积的多样性监测类文献来看,53%的研究样方覆盖面积小于10 km²(图1b),约40%的文献并没有明确提到抽样面积的具体数值。Mokany等(2013)曾通过群落物种模拟演示 α 和 β 多样性随抽样面积变化的情况并用真实物种进行了验证,指出抽样面积不足可能会丢失物种组成随环境梯度变化的信息,降低对总体多样性估计的准确性,同时指出抽样面积至少是整个研究区域的10%才能对 α 和 β 多样性均做出可信度较高的统计推断。我们在实践中亦应考虑面积与物种数的关系,确保抽样面积能够说明感兴趣的生物学现象或问题。此外,需注意SAC的形状与采用的拟合函数有关,研究者应避免不恰当拟合导致过早中止抽样。不仅是物种多样性监测,开展种群生态学研究,也需要在收集详尽基础资料并做好充分预调查的基础上,结合目标物种在研究区域内的大致数量和活动范围,“量体裁衣”式地设置抽样方式和强度。否则,很可能无法获得符合要求的数据。

1.3 研究发展不均衡

国内红外相机监测在研究时间和地域上,也呈现出一些较为明显的趋势。首先,已发表的数据主要来自于对亚热带常绿阔叶林、暖温带落叶阔叶林及温带荒漠物种的监测,在此三类生境类型中开展工作的文献占发表论文总数的70%(图2)。虽然其余生境中也开展了类似的监测工作,但目前公开发表的数据并不多。当然,从积累研究资料到公开发表需要时间,相关文献的数据和信息尚可进一步补充。

我们对第一作者单位所在省份和研究区域所在省份进行统计后发现,约47%的论文由北京的科研机构所贡献,12%由浙江的机构所贡献。近40%的

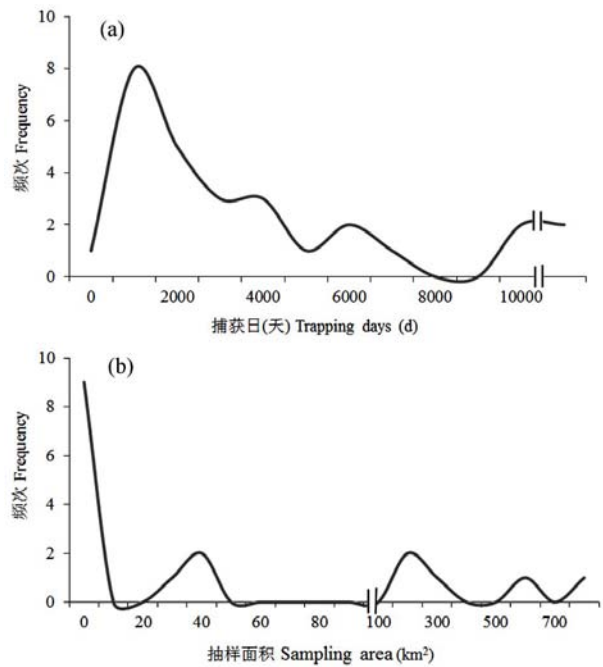


图1 红外相机监测研究中投入捕获日(a)和抽样面积(b)频度分布图
Fig.1 Frequency plot of trapping days spent in camera-trap researches (a) and sampling area of camera-trap researches (b)

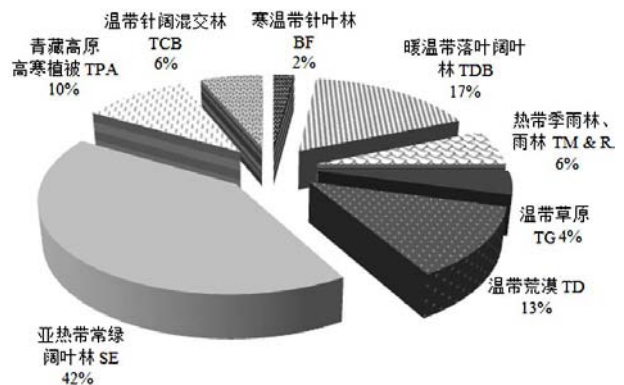


图2 不同植被类型和生境中开展红外相机监测研究的比例
Fig. 2 Efforts of camera-trap researches in vegetation and habitats types. BF, boreal forests; TDB, temperate deciduous broad-leaved forests; TM & R, tropical monsoon forests and rain forests; TG, temperate grassland; TD, temperate desert; SE, subtropical evergreen forests; TPA, alpine of Qinghai-Tibet Plateau; TCB, temperate coniferous broad-leaved forest

研究在贵州、湖北、河南、四川等省份开展,但本地学者并不是主要的研究力量(图3)。若能充分调动上述地区的本地科研力量,不仅能在整体上节约人力和物资成本,而且能促进当地的红外相机监测研究,有利于领域的长远发展。从发表时间上看,国

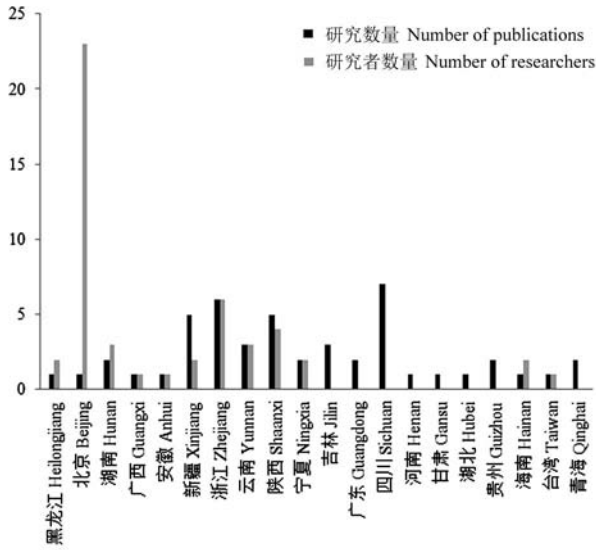


图3 红外相机监测研究的地域差异
Fig. 3 Geographic bias in research contribution of camera traps

内绝大多数文献发表于2011年之后(图4a), 除了少数研究从开始监测到结论发表的时间超过36个月以外, 其余研究该周期都在30个月之内(图4b)。某一地区的动物多样性在时空上是动态变化的, 在相机数量有限的情况下要想捕捉到这种异质性, 需要足够时间和面积的抽样。仅估算一定面积样方内某一季节的 α 多样性, 并用于解释地区物种多样性是不够完善的。

2 红外相机技术在应用中有哪些限制?

红外相机技术的优势已为大多数使用者所了解, 但该项技术仍存在一些缺陷, 具有一定的适用范围。

2.1 动物能够发现红外相机

红外相机对野生动物的干扰小, 但并非毫无影响。首先, 相机的存在本身就会引起某些野生动物的注意、好奇或者恐惧(Lehner *et al.*, 1976; Windberg, 1996)。研究者在四川唐家河、新疆昆仑山及阿勒泰地区开展红外相机监测研究时发现, 一些动物, 如, 大熊猫、棕熊(*Ursus arctos*)、马鹿(*Cervus elaphus*), 会由于好奇而“玩弄”相机, 弄歪甚至摔坏或踩毁相机(卢学理等, 2005; Xu *et al.*, 2008; 蒋志刚等, 2014)。其次, 嗅觉灵敏的物种可能察觉相机散发的塑料或金属气味, 以及其上附着的人类气味(Séquin

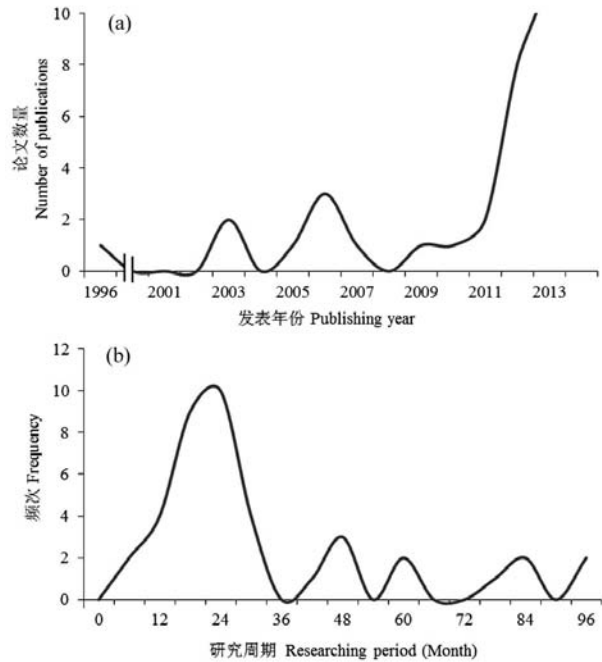


图4 国内红外相机监测研究发表论文数量的变化趋势(a)及相应的研究周期(从监测开始到结论发表的时间)(b)。
Fig. 4 Temporal trends in publication number (a) and researching periods of domestic researches (b) about camera traps

et al., 2003; Larrucea *et al.*, 2007), 并导致个体行为的改变。此外, 调查人员在相机周围活动可能会导致动物避开相机, 而多次使用食物诱饵或引诱剂则会使动物将“相机出现”与“食物”或气味联系起来, 增加动物被红外相机“捕获”的几率(Meek *et al.*, 2014)。

如果说上述情况中都只是包含着引起抽样偏差的潜在因素。那么不容忽视的事实是: 相机工作时产生的红外光、声波以及超声波虽然超出了人类的感知范围, 但有些动物却能感觉到。尽管红外相机并不发出可见闪光, 一些夜行性动物仍然可以看见其触发时发出的红外光(Hemmi *et al.*, 2000; Newbold & King, 2009)。Newbold等(2009)发现红外相机LED线路之外的电子元件在工作时会释放超声, 而有些动物确实能够听见这个波段的超声。Meek等(2014)的研究进一步证明, 无论红外相机处于触发还是正常待机状态, 动物都可能发现红外相机发出的视听信号。然而, 研究者们对此却关注甚少。当然, 在野外实践中, 背景环境一般不可能是完全安静的, 相机的声音很可能会被背景声音掩盖, 亦会在传播过程中衰减(Price *et al.*, 1988; Pater,

2001)。

研究者应根据调查目的和内容, 决定如何处理上述情况。如果调查目的是获取调查区域内某个或某些物种是否存在的信息, 那么可以忽略上述因素的影响; 如果需要获取该区域物种的相对丰富度或数量, 那么这些因素可能会通过影响不同个体、不同类群的捕获率而导致抽样偏差。而在动物行为学研究中, 更应结合目标动物的体型大小、生活史 (Huang *et al.*, 2000, 2002)、捕食行为、食性偏好 (Isley & Gysel, 1975) 等与视听能力有关的特征, 考虑红外相机本身释放的视听信号对目标的可能影响, 谨慎设计研究计划。

2.2 影像识别的限制

红外相机监测过程中会产生大量无效或难以识别物种的照片。国外同行正在不断改进方法, 克服相机运用中的限制和困难 (比如小型哺乳类监测, Wearn *et al.*, 2013)。Rovero 等 (2014) 最近通过研究证明, 将难识别照片包含的动物信息进行统计处理后纳入分析过程, 有助于提高哺乳动物群落多样性评估的准确性。国内研究者亦应通过实践, 积极探索如何降低无效照片数量、提高图像数据的可识别度以及挖掘难识别图像中信息的方法。红外相机成像质量与其性能、布设方法、参数设置等有关, 获取理想的照片记录首先应设置合理的参数。重要的参数有: 拍摄模式、图像尺寸、录像尺寸、连拍张数、录像长度、最小监测时长、灵敏度等。参数设置要依所拍动物习性、当地生境、调查强度和目的等而定, 因而正式研究开始前应开展预试验, 对权衡电池电能、存储卡容量, 以及得到理想影像尤为重要。使用者还可以与制造厂商联系, 根据研究需求更改红外相机的预设参数。如何合理安放相机涉及到拍摄位置、拍摄距离等很多野外工作的细节, 也可以在预实验中积累经验。我们在 2013 年和 2014 年夏、秋季节对新疆阿勒泰地区森林兽类的调查中, 发现将相机布设于动物痕迹较多的地点拍摄到动物个体的几率较高, 但这种方法只适用于发现种类, 而不能简单地用于估计密度 (资料整理中, 尚未发表)。

2.3 研究对象的限制

尽管红外相机具有诸多优点, 但有些类群或物种并不适合用该技术进行研究。对不同植被类型的生境内利用红外相机捕获鸟类和哺乳类物种数的统计结果表明 (图 5), 鸟类监测主要在暖温带落叶阔

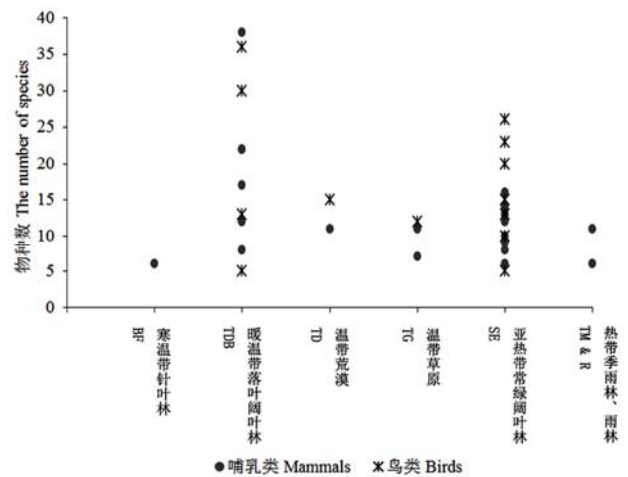


图 5 不同植被类型的生境内物种多样性监测结果比较

Fig. 5 Species richness in different vegetation and habitat types based on the camera trap monitoring. Abbreviations consulting in Fig. 2.

叶林和亚热带常绿阔叶林中开展, 不同研究监测结果的差异较大。一般来说, 森林生境中鸟类无论从多样性还是个体数量上都应明显高于哺乳类。然而, 许多种类由于体型小、飞行速度快、活动区域离地面较远, 难以被红外相机捕获到清晰影像, 增加了调查结果的不确定性。因此, 一些研究者提议布设于地面附近的红外相机更适用于大、中型地栖鸟类的监测, 而非鸟类物种普查 (Badru *et al.*, 2013; Tremaine *et al.*, 2014)。就哺乳类的监测结果而言, 在不同生境间的物种数没有显著差异 ($F=2.001$, $P=0.137 > 0.05$)。这一结果也可能是由于相机在捕获物种类群上的局限性所致, 但该假设有待于通过更多的研究积累进行验证。我们在研究中还发现, 红外相机对穴居爬行类的监测效果并不理想, 拍摄中产生的无效照片较多 (结果整理中, 尚未发表)。附表 1 总结了利用红外相机获得的不同动物类群的监测结果。基于该表, 建议在运用红外相机开展物种水平研究时, 对于体型小、移动速度快、体色与环境对比度低、外表难以甄别的物种或有形态相似种同域分布的研究对象时应当谨慎。进行物种分布或种群监测研究时, 适用于活动范围较大的动物; 进行动物行为研究时, 适用于选择活动范围狭小的动物。

就照片能够提供的信息量而言, 拍摄雌雄异型、第二性征明显、年龄特征明显的动物种类可提

取更多信息。建议研究者充分利用红外相机的优势,对一些由于活动隐蔽、难以跟踪观察、基础研究资料贫乏的动物类群(比如夜行性或中小型食肉兽类)开展研究。另外,到目前为止国内红外相机“捕获”的野生动物多是历史考察中已经发现的种类,极少发现历史记录以外的新种类。在一些研究中虽提到了历史调查中获得的物种总数(地区物种库容量的指标之一),但仅将其作为背景资料,极少有文献探讨相机捕获的物种数量、物种组成和已知物种库之间的关系。若就该方面展开进一步探讨,有助于全面理解红外相机是野生动物调查的补充手段,还是传统调查的替代方法这一问题。

2.4 红外相机在野外的安全保障问题

对我国发表文献中红外相机的损毁记录大致统计后发现,平均每项研究投入26台相机的情况下,损失率约为13%。相机丢失或损毁不仅造成财产损失,也影响野外数据的采集。为了避免无关人员偷拿或破坏红外相机,建议研究者选择人类活动少的地区作为布设点,也可以避开人类活动频繁的时间段,从时间和空间上降低红外相机被发现的可能性。若拟开展的研究必须在人类活动较多的区域取样(比如,研究实验区和核心区内动物行为或物种组成的差异),可与当地林业、野生动物管理部门合作,与民众交流沟通,获得支持,保护相机安全。针对动物破坏相机的行为,我们曾尝试将鲜嫩草叶揉碎涂抹在红外相机表面,以掩盖相机的气味,该方法还需进一步开展对照试验证明其效果。总之,研究人员应在实践中积累经验,在保护相机和拍到动物之间进行权衡,在样方内选择最有利的地点和方式布设红外相机。将相机安放于地面上容易因倒伏导致采样失败,一般应将其绑在树木、立柱等固定物上。我们在江西桃红岭自然保护区曾采用类似方法研究不同性别的野生梅花鹿利用舔盐点行为的差异,以及不同群体的大小与相互间的干扰竞争,发现这种布设方法可将相机牢牢固定,适于对某一地区的长期监测,在一定程度上也可以保障相机安全(Ping *et al.*, 2011a, b)。绑缚时应注意固定物的粗细和牢固程度,避免利用较细或生长在石坡上的树木及未倒枯木。

未来,红外相机监测将成为自然保护区的常规监测手段,会积累大量数据。研究者们应对目前工作中存在的一些共性的问题给予关注,总结经验,

稳步渐行,并能在前述问题的基础上,继续探索如下问题:(1)怎样有效利用红外相机的录像功能?对于不同物种或动物类群,如何提高种群数量估计的准确性?(2)在可到达条件受限制时,如何调整预定的实验设计?调整抽样方案将对统计建模带来何种影响?(3)如何在保证研究者的版权和优先发表权的前提下,收集全国的红外相机照片,建立红外相机照片宏数据库?(4)红外相机将成为一个公众科学手段,如何充分利用这一特点,动员公众参与,提高红外相机监测效率?

以上问题仅为引玉之砖,希望研究者们不要为固有的研究模式所束缚,客观评价红外相机在我国野生动物监测中的效果,开阔思路,大胆尝试,合理有效地利用这一调查工具,红外相机技术才能有更为广阔的应用前景。

参考文献

- Badru M, Douglas S, Peter S, Miriam van H, Pontious E (2013) A camera trap assessment of terrestrial vertebrates in Bwindi Impenetrable National Park, Uganda. *African Journal of Ecology*, **51**, 21–31.
- Brackman LS (2000) Not-So-Candid camera, please: law enforcement officers violate the fourth amendment when the media tags along. *Missouri Law Review*, **65**, 743.
- Carbone C, Christie S, Conforti K, Coulson T, Franklin N, Ginsberg JR, Griffiths M, Holden J, Kawanishi K, Kinnaird M, Laidlaw R, Lynam A, Macdonald DW, Martyr D, McDougal C, Nath L, O'Brien T, Seidensticker J, Smith DJL, Sunquist M, Tilson R, Wan Shahrudin WN (2006) The use of photographic rates to estimate densities of tigers and other cryptic mammals. *Animal Conservation*, **4**, 75–79.
- Chen XR (陈小荣), Xu DM (许大明), Bao YX (鲍毅新), Zhang SS (章书声) (2013) Mammalian species diversity in Baishanzu National Nature Reserve, Zhejiang Province of East China based on G-F index. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **32**, 1421–1427. (in Chinese with English abstract)
- Efford MG (2009) *Secr—Spatially Explicit Capture-recapture in R, version 1.2.10*. Department of Zoology, University of Otago, Dunedin. <http://www.otago.ac.nz/density/pdfs/secr-manual%201.2.10.pdf>. (10/10/2014)
- Gopaldaswamy AM, Royle JA, Hines JE, Singh P, Jathanna D, Kumar N, Karanth KU (2012) Program SPACECAP: software for estimating animal density using spatially explicit capture-recapture models. *Methods in Ecology and Evolution*, **3**, 1067–1072.
- Hemmi JM, Maddess T, Mark RF (2000) Spectral sensitivity of photoreceptors in an Australian marsupial, the tammar wallaby (*Macropus eugenii*). *Vision Research*, **40**, 591–599.
- Hines JE (2010) *Capture 2. Patuxent: USGS PWRC*. <http://>

- www.mbr-pwrc.usgs.gov/software/capture.html.(10/10/2014)
- Hu TH (胡天华), Li YG (李元刚) (2013) Application of camera traps in wildlife monitoring of Helan Mountain Natural Reserve, Ningxia. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology* (宁夏农林科技), **54**, 57–59. (in Chinese)
- Huang GT, Rosowski JJ, Peake WT (2000) Relating middle-ear acoustic performance to body size in the cat family: measurements and models. *Journal of Comparative Physiology A*, **186**, 447–465.
- Huang G, Rosowski J, Ravicz M, Peake W (2002) Mammalian ear specializations in arid habitats: structural and functional evidence from sand cat (*Felis margarita*). *Journal of Comparative Physiology A*, **188**, 663–681.
- Isley TE, Gysel LW (1975) Sound-source localization by the red fox. *Journal of Mammalogy*, **56**, 397–404.
- Jiang ZG (蒋志刚) (2004) *Animal Behavioral Principles and Species Conservation Methods* (动物行为原理与物种保护方法). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Jiang ZG (蒋志刚), Sun JZ (孙吉周), Cui SP (崔绍朋), Chen DQ (陈代强), Zhang LB (张履冰), Li CW (李春旺), Tang SH (汤宋华), Chu HJ (初红军) (2014) Moose *Alces alces* in Mt. Altay, Xinjiang. *Chinese Journal of Zoology* (动物学杂志), **49**, 303–304. (in Chinese with English abstract)
- Larrucea ES, Brussard PF, Jaeger MM, Barrett RH (2007) Cameras, coyotes and the assumption of equal detectability. *Journal of Wildlife Management*, **71**, 1682–1689.
- Lehner PN, Krumm R, Cringan AT (1976) Tests for olfactory repellents for coyotes and dogs. *Journal of Wildlife Management*, **40**, 145–150.
- Li F (李峰), Jiang ZG (蒋志刚) (2014) Is nocturnal rhythm of Asian badger (*Meles leucurus*) caused by human activity? A case study in the eastern area of Qinghai Lake. *Biodiversity Science* (生物多样性), **22**, 758–763. (in Chinese with English abstract)
- Li M (李敏), Wang JC (汪继超), Liu HW (刘海伟), Shi HT (史海涛) (2014) Simulation of *Cuora galbinifrons* nest predation. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **33**, 1629–1633. (in Chinese with English abstract)
- Li S, McShea WJ, Wang DJ, Shao LK, Shi XG (2010) The use of infrared-triggered cameras for surveying phasianids in Sichuan Province, China. *IBIS*, **152**, 299–309.
- Li ZX (李志兴) (2003) China's first photo of wild tiger using infrared camera. *Chinese Journal of Wildlife* (野生动物学报), (5), 35–38. (in Chinese)
- Li ZL (李治霖), Kang AL (康霭黎), Lang JM (郎建民), Xue YG (薛延刚), Ren Y (任毅), Zhu ZW (朱志文), Ma JZ (马建章), Liu PQ (刘培琦), Jiang GS (姜广顺) (2014) On the assessment of big cats and their prey populations based on camera trap data. *Biodiversity Science* (生物多样性), **22**, 725–732. (in Chinese with English abstract)
- Liu DZ (刘东志), Jiang ZG (蒋志刚), Chu HJ (初红军), Huang XW (黄效文), Zhang F (张帆), Chen G (陈刚) (2013) Summer nocturnal activity rhythms and time budgets of the Sino-Mongolia beaver (*Castor fiber birulai*) in Xinjiang, China. *Acta Theriologica Sinica* (兽类学报), **33**, 319–325. (in Chinese with English abstract)
- Liu F (刘芳), Li DQ (李迪强), Wu JG (吴记贵) (2012) Using infra-red cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **32**, 730–739. (in Chinese with English abstract)
- Lu XL (卢学理), Jiang ZG (蒋志刚), Tang JR (唐继荣), Wang XJ (王学杰), Xiang DQ (向定乾), Zhang JP (张建平) (2005) Auto-trigger camera traps for studying giant panda and its sympatric wildlife species. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), **51**, 495–500. (in Chinese with English abstract)
- Ma M (马鸣), Xu F (徐峰), Chundawat RS, Jumabay K, Wu YQ (吴逸群), Ai ZZ (艾则孜), Zhu MH (朱玛洪) (2006) Camera trapping of snow leopards for the photo capture rate and population size in the Muzat Valley of Tianshan Mountains. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), **52**, 788–793. (in Chinese with English abstract)
- Meek PD, Ballard G, Fleming PJS, Schaefer M, Williams W, Falzon G (2014) Camera traps can be heard and seen by animals. *PLoS ONE*, **9**, e110832. doi: 10.1371/journal.pone.0110832.
- Mokany K, Jones MM, Harwood DT (2013) Scaling pairwise β -diversity and α -diversity with area. *Journal of Biogeography*, **40**, 2299–2309.
- Newbold HG, King CM (2009) Can a predator see 'invisible' light? Infrared vision in ferrets (*Mustela furo*). *Wildlife Research*, **36**, 309–318.
- O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT (2003) Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, **6**, 131–139.
- O'Brien T, Baillie J, Krueger L, Cuke M (2010) The Wildlife Picture Index: monitoring top trophic levels. *Animal Conservation*, **13**, 335–343.
- O'Connell AF, Nichols JD, Karanth KU (2011) *Camera Traps in Animal Ecology: Methods and Analyses*. Springer, New York.
- Pater L (2001) Defining auditory thresholds for animal species. ALIS.
- Ping X, Li C, Jiang Z, Liu W, Zhu H (2011a) Sexual difference in seasonal patterns of salt lick use by south China sika deer *Cervus nippon*. *Mammalian Biology*, **76**, 196–200.
- Ping X, Li C, Jiang Z, Liu W, Zhu H (2011b) Interference competition and group size effect in sika deer (*Cervus nippon*) at salt licks. *Ethologica*, **14**, 43–49.
- Price MA, Attenborough K, Heap NW (1988) Sound attenuation through trees: measurements and models. *Journal of the Acoustical Society of America*, **84**, 1836–1844.
- Rowcliffe JM, Kays R, Kranstauber B, Carbone C, Jansen PA (2014) Quantifying levels of animal activity using camera trap data. *Methods in Ecology and Evolution*, doi:

- 10.1111/2041-210X.12278 (2014/10/15)
- Rovero F, Martin E, Rosa M, Ahumada JA, Spitalo D (2014) Estimating species richness and modelling habitat preferences of tropical forest mammals from camera trap data. *PLoS ONE*, **9**, e103300. doi:10.1371/journal.pone.0103300 (2014/10/12)
- Schipper J (2007) Camera-trap avoidance by Kinkajous *Potos flavus*: rethinking the “non invasive” paradigm. *Small Carnivore Conservation*, **36**, 38–41.
- Séquin ES, Jaeger MM, Brussard PF, Barrett RH (2003) Wariness of coyotes to camera traps relative to social status and territory boundaries. *Canadian Journal of Zoology*, **81**, 2015–2025.
- Si XF, Kays R, Ding P (2014) How long is enough to detect terrestrial animals? Estimating the minimum trapping effort on camera traps. *PeerJ*, **2**, e374.
- Tremaine G, Farah CR, Jessica D, Joseph K, Alfonso A (2014) Arboreal camera trapping: taking a proven method to new heights. *Methods in Ecology and Evolution*, **5**, 443–451.
- Trolle M, Kéry M (2003) Estimation of ocelot density in the Pantanal using capture-recapture analysis of camera-trapping data. *Journal of Mammalogy*, **84**, 607–614.
- Wang JJ (王佳佳), Yu ZG (余志刚), Li ZM (李筑眉), Jiang H (蒋鸿), Liang W (梁伟) (2014) Identifying predators of ground nests of birds in Kuankuoshui Nature Reserve, Guizhou, southwestern China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **33**, 352–357. (in Chinese with English abstract)
- Wang Y (王云), Piao ZJ (朴正吉), Guan L (关磊), Kong YP (孔亚平) (2013) Influence of Ring Changbai Mountain Scenic Highway on wildlife. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **32**, 425–435. (in Chinese with English abstract)
- Wearn OR, Rowcliffe JM, Carbone C, Bernard H, Ewers RM (2013) Assessing the status of wild felids in a highly-disturbed commercial forest reserve in Borneo and the implications for camera trap survey design. *PLoS ONE*, **8**, e77598. doi:10.1371/journal.pone.0077598.
- Wegge P, Pokheral CP, Jnawali SR (2004) Effects of trapping effort and trap shyness on estimates of tiger abundance from camera trap studies. *Animal Conservation*, **7**, 251–256.
- Windberg LA (1996) Coyote responses to visual and olfactory stimuli related to familiarity with an area. *Canadian Journal of Zoology*, **74**, 2248–2253.
- Xiao ZS (肖治术), Wang XZ (王学志), Li XH (李欣海) (2014a) An introduction to CameraData: an online database of wildlife camera trap data. *Biodiversity Science* (生物多样性), **22**, 712–716. (in Chinese with English abstract)
- Xiao ZS (肖治术), Li XH (李欣海), Wang XZ (王学志), Zhou QH (周岐海), Quan RC (权锐昌), Shen XL (申小莉), Li S (李晟) (2014b) Developing camera-trapping protocols for wildlife monitoring in Chinese forests. *Biodiversity Science* (生物多样性), **22**, 704–711. (in Chinese with English abstract)
- Xu AC, Jiang ZG, Li CW, Guo JX, Da SL, Cui QH, Yu SY, Wu GS (2008) Status and conservation of the snow leopard *Panthera uncia* in the Gouli Region, Kunlun Mountains, China. *Oryx*, **42**, 460–463.
- Xue YD (薛亚东), Liu F (刘芳), Guo TZ (郭铁征), Yuan L (袁磊), Li DQ (李迪强) (2014) Using camera traps to survey wildlife at water sources on the northern slope of the Altun Mountains, China. *Acta Theriologica Sinica* (兽类学报), **34**, 164–171. (in Chinese with English abstract)
- Zhang SS (章书声), Bao YX (鲍毅新), Wang YN (王艳妮), Fang PF (方平福), Ye B (叶彬) (2012) Activity rhythms of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) revealed with infrared camera. *Acta Theriologica Sinica* (兽类学报), **32**, 368–372. (in Chinese with English abstract)
- Zhang SS (章书声), Bao YX (鲍毅新), Wang YN (王艳妮), Fang PF (方平福), Ye B (叶彬) (2013) Estimating rodent density using infrared-triggered camera technology. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **33**, 3241–3247. (in Chinese with English abstract)
- Zhao YZ (赵玉泽), Wang ZC (王志臣), Xu JL (徐基良), Luo X (罗旭), An LD (安丽丹) (2013) Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves’s pheasant (*Syrnaticus reevesii*) using infrared camera. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **33**, 6021–6027. (in Chinese with English abstract)
- Zheng WC (郑伟成), Zhang SS (章书声), Pan CC (潘成椿), Liu JL (刘菊莲), Ji GH (季国华) (2014) Mammal and avian diversity detected by infrared cameras in Jiulongshan National Nature Reserve. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology* (浙江林业科技), **34**, 17–22. (in Chinese)

(责任编辑: 蒋学龙 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附表1 我国野生动物监测研究中运用红外相机捕获鸟、兽概况

Table S1 Mammal and bird groups captured with infrared-camera traps in wildlife research and monitoring of China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-225-1.pdf>

张履冰,崔绍朋,黄元骏,陈代强,乔慧捷,李春旺,蒋志刚. 红外相机技术在我国野生动物监测中的应用: 问题与限制. 生物多样性, 2014, 22(6): 696-703. <http://www.biodiversity-science.net/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=9945>

附表1 我国野生动物监测研究中运用红外相机捕获鸟、兽概况

Table S1 Mammal and bird groups captured with infrared-camera traps in wildlife research and monitoring of China

动物类群 Taxon	种群或多样性研究		行为学研究	
	Researches on population ecology or biodiversity		Researches on animal behavior	
	频数*	种类数*	频数	种类数
	Frequency	Species number	Frequency	Species number
哺乳纲 Mammalia				
食肉目 Carnivora				
犬科 Canidae	8	5		
猫科 Felidae	27	7	3	1
鼬科 Mustelidae	46	8		
熊猫科和熊科 Ailuropodidae, Ursidae	7	2		
灵猫科 Viverridae	18	4		
偶蹄目 Artiodactyla				
鹿科 Cervidae	30	9	1	1
牛科 Bovidae	24	9		
猪科 Suidae	16	1		
麝科 Moschidae	4	3		
骆驼科 Camelidae	1	1	1	1
灵长目 Primates				
猴科 Cercopithecidae	8	4		
懒猴科 Lorisidae	2	2		
啮齿目 Rodentia				
松鼠科 Sciuridae	33	9		
鼠科 Muridae	14	>4		
鼯形鼠科 Spalacidae	2	2		
豪猪科 Hystricidae	5	1		
兔形目 Lagomorpha				
兔科 Leporidae	10	5		
鼠兔科 Ochotonidae	1	1		
奇蹄目 Perissodactyla				
马科 Equidae	1	1		
食虫类 Insectivora				
鼯鼯科 Soricidae	2	1		
猬科 Erinaceidae	3	1		
鳞甲目 Pholidota				
鲛鲤科 Manidae	1	1		
树鼯目 Scandentia				
树鼯科 Tupaiidae	1	1		
翼手目 Chiroptera				
狐蝠科 Pteropodidae			1	2
鸟纲 Aves				
雀形目 Passeriformes	151	-		
鸡形目 Galliformes	17	-	3	2
鸽形目 Columbiformes	4	-		
隼形目 Falconiformes	8	-		
鸮形目 Strigiformes	3	-		
鸺形目 Coraciiformes	8	-		
鸨形目 Charadriiformes	1	-		

*频数和种类数为该类群在已发表的红外相机监测结果中出现次数及种类数的总和。照片中有较多鸟类个体无法准确鉴定到“种”一级分类阶

元，故本表中乌纲没有按种统计总数。