

非人灵长类种群数量调查方法综述

陈熙尔¹ 殷丽洁^{1,2*} 秦大公^{1,2} 姚锦仙¹ 李小雨¹ 潘文石¹

(1 北京大学生命科学学院, 自然保护与社会发展研究中心, 北京 100871) (2 北京大学生态研究中心, 北京 100871)

摘要: 监测估算野生动物的种群数量是保护的核心工作。由于气候变化和人类活动的影响, 野生动物种群常处于不稳定的状态。非人灵长类是动物界的高等类群, 具有复杂的社会行为、丰富的物种多样性, 全球有 701 种 (含亚种), 生活在多种类型的栖息地中, 包括热带雨林、沼泽森林、红树林、次生林、落叶林、季雨林、山地森林, 和包含孤存林、长廊森林、热带旱生林、山地草甸、地中海灌木林的稀树草原和干草原, 以及荒漠、干旱的山地, 甚至是雪地。绝大多数非人灵长类处于濒危的状态, 长期有效的监测对于灵长类的保护十分重要。物种多样性和栖息地类型的多样性使得灵长类种群数量的调查方法多种多样。本文归纳总结了目前常用的非人灵长类种群数量调查方法的类型、基本原理、适用场景和局限性, 并以研究实例加以分析; 介绍了无人机、热成像、计算机学习系统等新技术应用在调查方法中的进展, 希望为今后的非人灵长类野外数量调查、种群监测提供参考和启发。

关键词: 灵长类; 直接计数法; 样线法; 样点法; 红外相机调查法; 遗传调查法; 无人机调查法

中图分类号: Q958

文献标识码: A

文章编号: 1000–1050 (2022) 06–0716–12

An overview of population survey methods of non-human primates

CHEN Xier¹, YIN Lijie^{1,2*}, QIN Dagong^{1,2}, YAO Jinxian¹, LI Xiaoyu¹, PAN Wenshi¹

(1 Peking University, School of Life Science, PKU Center for Nature and Society, Beijing 100871, China)

(2 Peking University Institute of Ecology, Beijing 100871, China)

Abstract: Monitoring and estimating wildlife population size is essential to conservation. Affected by global climate change and human activities, wildlife populations could be relatively unstable. Primates are a group of highly evolved taxa in the animal kingdom and are among the most social of animals. As many as 701 species or subspecies of primates are recognized globally, forming a rich diversity. They could be found in various types of habitats, including rain forests, swamp forests, mangroves, secondary forests, deciduous forests, monsoon forests and montane forests, as well as in grasslands (savannah and steppe) including forest outliers, gallery forests, wooded steppes, thorn forests, Mediterranean scrubs and montane meadows, and even in deserts, dry uplands or permanent snow. Most primate species are endangered from different causes, and therefore effective long-term monitoring is of significant value to primate conservation. Species and habitat diversity have contributed to the numerous methods of censusing primate populations. This article offers a summary of widely-used non-human primate population censusing methods, including the classifications, the fundamentals, the various scenarios for application, and their limitations. The methods are analyzed with case studies and research. Furthermore, we introduce the latest applications of drones, thermal imaging and computer deep learning in primate population surveys, hoping to offer some insights into future non-human primate censusing and population monitoring.

Key words: Primates; Total count; Line transect sampling; Point census; Infra-red camera trap survey; Genetic methods of surveying; Survey by unmanned aerial vehicle

估算野生动物的种群数量是保护的核心工作 (Keeping *et al.*, 2018)。由于气候变化和人类活动的影响, 野生动物的种群绝大多数处于不稳定的状态, 需要长期的监测, 迫切需要简单高效的生

基金项目: 北京大学基础科学学生培养拔尖计划; 北京市企业家环保基金会《广西渠楠保护小区白头叶猴种群监测及社会行为的初步研究》

作者简介: 陈熙尔 (1996–), 男, 硕士, 主要从事保护生物学研究和实践

收稿日期: 2021–12–29; **接受日期:** 2022–09–23

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: ljyin@pku.edu.cn

物多样性监测手段 (Danielsen *et al.*, 2005)。灵长类是动物界的最高等类群, 具有复杂的社群结构和丰富的物种多样性, 全世界非人灵长类共有 2 个亚目 18 科 (亚科) 76 属 508 种 701 个分类单元 (Strier, 2017)。目前全球 65% 的非人灵长类濒临灭绝, 93% 的种群呈下降的趋势 (Estrada and Garber, 2022), 对非人灵长类动物的保护和种群数量的监测刻不容缓。我国拥有丰富的灵长类动物资源, 3 科 8 属 28 种, 含亚种 48 种 (龙勇诚等, 2016; Fan *et al.*, 2017), 主要分布在热带北缘和亚热带, 位于我国西南、华南山地。随着我国非人灵长类研究力量的不断发展壮大, 对行为学、生态学、遗传学等的研究越来越深入 (Xia *et al.*, 2012; Qi *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2014; 尹峰等, 2015; Fan and Ma, 2018; Zhao *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022)。另一方面, 由于人类活动造成的栖息地破坏, 很多物种仍处于濒危状态。尽管有一些种群增长 (Fan *et al.*, 2022), 但 70% 的非人灵长类种群数量不超过 3 000 只 (Chapman, 2018), 预计到 2100 年, 非人灵长类动物在我国的分布将有可能进一步减少 51%~87% (Li *et al.*, 2018)。随着我国对野生动物的保护愈来愈重视, 对非人灵长类动物种群进行数量调查、种群动态监测和评估保护效果是未来保护工作的重要内容。

结合 Distance 模型的样线法广泛应用于全球陆地和海洋中的动植物调查, Distance 软件的免费使用和不断地更新改进, 使其已被上百个国家下载使用 (Thomas *et al.*, 2010)。同样, 在非人灵长类的种群数量调查中, 样线法经常被采用 (Hanya *et al.*, 2003; Estrada *et al.*, 2004; Aldrich, 2008; Cheyne *et al.*, 2008; Bapureddy *et al.*, 2015; Piel *et al.*, 2015; Gestich *et al.*, 2016; van Kuijk *et al.*, 2016)。但也有研究表明对于长期的监测工作, 从成本和效率综合考虑, 样线法调查也许并不是最优方案 (Keeping *et al.*, 2018), 在某些地区, 由当地工作人员进行的长期跟踪记录可能更为有效, 而且当地居民参与保护工作十分重要 (Hulme and Murphree, 2001)。

非人灵长类动物的栖息地类型非常多样, 包括热带雨林、沼泽森林、红树林、次生林、落叶林、季雨林、山地森林, 包含孤存林、长廊森林、热带旱生林、山地草甸、地中海灌木林的稀

树草原和干草原, 以及荒漠、干旱的山地, 甚至是雪地 (Napier and Napier, 1994)。因此, 在进行种群数量调查, 选取调查方法时, 需要考虑地形的复杂程度。目前常用的非人灵长类的种群数量调查方法主要有样线法、样点法、直接计数法、红外相机调查法、遗传调查法和无人机调查法等。本文将在分析实际研究案例的基础上, 探讨各种调查方法的特点和可行性, 并介绍热成像、计算机学习系统等新技术应用在调查方法中的进展, 为未来非人灵长类的种群数量调查和种群监测提供参考。

1 逐个计数法

1.1 方法简介

使用逐个计数法进行种群数量调查主要分为两个阶段: 第一阶段, 因为绝大多数非人灵长类是群居动物, 主要以群为单位进行活动, 因此在野外调查时首先需要确定群的位置和活动范围。通过访谈收集资料, 被访对象是调查地的居民、护林员等。这些人群对动物的分布和群体大小, 甚至习性等有所了解, 能提供有价值的信息, 在很大程度上帮助调查人员聚焦调查范围和关键区域。第二阶段, 调查人员在访谈调查获得的信息基础上, 初步推测非人灵长类的分布范围, 设置调查区域与调查路线。调查进行时通常需要多组调查人员同步进行监测, 并追踪猴群, 逐一计数。如果对非人灵长类群体的生活习性非常熟悉, 可以在其经常活动的地方、夜宿地点进行蹲点守候, 或者当其通过开阔地带时清点数量, 更为有效。如在云南高黎贡山自然保护区对一群怒江金丝猴 (*Rhinopithecus strykeri*) 的研究中, 当猴群通过较为开阔的林窗时, 使用望远镜进行计数 (李光松等, 2014)。我国非人灵长类的数量调查大多采用直接逐个计数的方法。例如猕猴的种群数量调查 (江海声等, 1988; 田军东, 2011; 王相龙等, 2021; 付文等, 2021); 金丝猴的数量调查: 陕西长青自然保护区的金丝猴数量调查 (袁朝晖等, 2003)、贵州梵净山自然保护区的黔金丝猴 (*Rhinopithecus brelichi*) 数量调查 (杨业勤等, 2001) (未正式出版)、云南白马雪山的滇金丝猴 (*Rhinopithecus bieti*) 数量调查 (施方勤, 2009)、云南龙马山的滇金丝猴数量调查 (徐会明等, 2015); 黑叶猴 (*Trachypithecus francoisi*) 与白头叶猴 (*Trachypithecus leucocephalus*)

的数量调查(冉文忠, 2003; 王振兴等, 2014; 邓怀庆和周江, 2018; 李文华等, 2019)。逐个计数法主要适用于昼行性非人灵长类。

1.2 优点和局限性

逐个计数法虽然简单直接, 但是在很多情况下不失为一种好用且操作性强的方法, 特别是对群体数量较少的群居型非人灵长类动物种群进行调查时, 往往能以有限的投入获得较为精确的种群数量。同时, 这种逐个计数的方法在地貌起伏较大, 地形复杂的区域仍然适用, 这一点较样线法具有很大的优势。此外, 还可采用录像等辅助手段(李光松等, 2014), 对视频资料反复观看计数, 提高准确率。直接计数容易受到外界因素的干扰, 因此需要多次调查, 将结果汇总进行统计处理, 得到一定范围内的个体数量。逐个清点的方法需要长期的观察与数据收集才能获得较为准确的结果, 不适合在短周期内和有限的人力情况下对较大研究区域的非人灵长类数量进行调查。

1.3 实例分析

在无量山对印支灰叶猴(*Trachypithecus crepusculus*)的调查研究中即采取了直接计数的方法(Ma et al., 2015)。研究者前期进行了半结构式的访谈调查, 让近年目击过灰叶猴的村民、护林员结合地形图和照片指出目击点位置, 并尽可能提供猴群的个体数量等信息。在随后的野外调查中, 调查人员主要在前期访谈时标出的多个目击地点附近, 采用跟踪、直接计数的方法进行数量调查。调查人员在分析数据时比较了其中8个群的调查结果与采访获得的数据, 通过跟踪观察并采用直接计数法所得到的猴群数量平均为同一猴群访谈结果的1.6倍, 直接计数所获得的猴群数量显著大于采访中获得的数据, 以此为依据对采访中获得的整片无量山地区的种群大小做出修正, 给出了修正后估计的结果。当地居民或护林员平日巡护时获得的数据很有价值, 但是往往会因为调查人员不足, 观察难度较大及经验、时间有限等原因使得猴群的计数结果偏小。这种通过局部调查获得跟踪计数数据与访谈结果之间的修正系数, 进而修正全部区域的访谈结果的方法, 对于在区域面积大、地形复杂及难以对全部区域的猴群进行观察时值得借鉴。

江海声等(1988)在对海南岛南湾半岛猕猴

(*Macaca mulatta brevicaudatus*)进行调查时采用了另一种将逐个计数法与统计方法相结合的调查方法。他们选取了5个猕猴的样本群, 数天内连续采用投食引诱(以保证能看到群中的所有个体)的方法定点观察, 分别得到样本群个体的数量; 之后在样本群无投食时的活动范围内进行定点观察计数, 并求出无投食时的个体数量占实际个体数量(投食时)的比例, 计算5个样本群比值的平均值; 得到以上数据后, 对其他猴群无需投食, 只需统计无投食时的个体数便可推算出总体数目。此研究利用样本猴群自由活动时的观测计数与实际个体数之间的修正关系对总体进行推算, 调查经济、省时, 结果准确。而在猴群边缘或者之外活动的散猴, 则划分为随群散猴与离群散猴两类, 对随群活动的散猴根据对猴群计数时记录的散猴数量和比例给予估计; 对离群散猴则采取独立的小样方观察统计的方法得到其数量。

对陕西米仓山国家级自然保护区的猕猴种群数量也采用了直接计数的方法(赵海涛等, 2015)。首先通过访问获得调查的本底图, 在本底范围内设计两条“V”型路线分两组观察跟踪猴群。为了减少偏差, 采用最小数值原则进行计数, 并通过对讲机避免两组人员重复计数。

上述3个研究虽然都采用了逐个计数法, 但结合各自猴群和环境特点, 在已有的信息基础上对研究方法进行设计, 运用抽样、校正等统计方法减轻工作量, 实施简单有效。

2 样线法

2.1 方法简介

样线法是运用最广泛的距离抽样调查方法, 是通过记录探测事件与样线或样点间的距离, 从而估计物种丰度或密度的调查方法的总称。样线法的设计思路是在调查区域内随机设立多条样线, 或系统地设置一系列相互平行的样线(起点需满足随机性), 提前设定样带一侧的宽度值, 调查人员以一定速度沿样线行进, 记录样带内所有探测到的动物个体以及动物到样线的垂直距离; 如果调查对象为群居性物种, 如多数非人灵长类, 探测事件则为群体, 并需记录群体的大小, 确定群体中心到样线的垂直距离。样线法不仅适用于昼行性非人灵长类也适用于夜行性非人灵长类。调查人员在夜间动物活跃期以一定速度在事先规划好

的样线上行进, 利用红光或白光探照灯在样线两侧搜寻动物, 根据样线长度、调查时长和遇见频次计算遇见率, 获得非人灵长类种群的一个相对多度衡量 (Nekaris *et al.*, 2008)。

传统样线法认为, 处于样线上的个体 (群体) 被探测到的概率为 1, 距样线垂直距离越远, 被探测到的概率越低, 因此记录到的探测事件并未涵盖样带内的所有个体。调查所得的距离分布可以用于模型拟合, 从而选取合适的探测概率函数, 根据垂直距离越远, 被探测概率越低, 采用不同函数模型对调查数据进行拟合获得探测函数, 以此对数据进行修正, 补充样带中未被记录到的可能存在的个体, 并计算种群密度。目前样线法仍在野外调查中被不断发展, 希望丰富和完善的内容包括如何获得更好的探测概率函数, 以及围绕样线法的几大前提展开精度估计 (Buckland *et al.*, 2010a)。

理论上对非人灵长类运用样线法需要满足 3 个关键假设 (Thomas *et al.*, 2010): (1) 样线上的个体探测概率为 1。如未满足此假设, Distance 软件运行时不同模型对密度的估计差异较大。若实际情况需要放宽此假设, 可采用双观察者法采集数据, 数据可用 Distance 软件里的标志重捕—双观察者工具处理。(2) 记录距离时动物个体未移动。若动物因对调查者作出反应而发生移动, 则无法满足探测事件独立于样线的抽样假设。(3) 距离测量精确。通过对调查者的训练与技术设备 (如激光测距仪), 可有效地满足此假设。

此外, 为了满足探测事件独立于样线, 需要设置足够数量的随机样线, 因此主观地设置或沿已有的公路、步道设置样线并不能很好地满足独立性。样线法在设计调查方案与进行数据分析时均可使用 Distance 软件 (Thomas *et al.*, 2010)。取样的基本原则为重复性和随机性, 因此一系列系统设置、相互平行、起点随机的样线能够很好地满足抽样原则, 同时让调查区域 (标准长方形) 内各点被调查覆盖到的概率相等。在边界复杂的调查区域中, 边界被调查覆盖的概率较低, 因此建议在一定缓冲区域内取样。而如果已知物种在区域内的分布存在一定的密度梯度, 则可考虑分层取样或者平行于密度梯度设置样线, 从而控制标准差。Distance 软件内置的调查设计工具能够帮助调

查者完成调查设计, 并计算不同调查方案中调查区域各点的覆盖概率, 在实施野外调查前能够评估方案的合理性, 选取合适的方案。

探测概率函数的估计根据调查设计和目的的不同, 可使用 Distance 软件中的不同工具完成 (Thomas *et al.*, 2010)。CDS (Conventional distance sampling) 工具适用于传统样线法设计, 即样线上的动物被探测到的概率为 1, 探测概率函数适用于整个区域; MCDS (Multiple-covariate distance sampling) 工具用于多协变量样线法, 除距离外, 这种设计允许引入影响探测概率的其他协变量, 如群体的大小、栖息地类型、观察者情况等, 允许不唯一的探测概率函数; MRDS (Mark-recapture distance sampling) 工具则适用于标志重捕—双观察者的调查设计; 此外, 较先进的 DSM (Density surface modelling) 工具可以应对更为复杂的实际情况, 例如物种的密度分布受地形等环境因子制约, 此工具可纳入地理信息图层建立密度分布模型, 其仍在不断开发和完善中。模型的精度估计可选用软件提供的重抽样法或分析法。DSM 工具适用于复杂的环境条件, 非人灵长类调查可以尝试使用。

2.2 优点和局限性

样线法更适合在短期内相对快速地对一个区域的非人灵长类种群密度作估计, 调查周期较短, 充分利用了数学模型与计算机技术, 并能够给出计算结果的精度估计。根据研究地实际情况与研究目的, 研究者可方便地使用 Distance 软件进行调查方案设计、数据处理。与逐个计数法相比, 样线法的不确定因素更多, 比如在数据搜集过程中, 对距离的估计、对群体中心的确定都容易因设备或调查者经验等原因与实际有较大偏差; 对于非人灵长类来说, 实施样线法时通常采用记录群体的方法, 依赖于对群体个体数进行准确地记录, 而这也是另外一种不确定性。样线法需要满足的 3 个关键假设看似简单, 但实际调查中很难同时满足, 特别是生活环境多样的非人灵长类动物, 对应的误差也会积累变大。

样线法调查设计的基本原则是样线的“随机性”与“重复性” (Buckland *et al.*, 2010a), 而在实地操作中, 调查区域的地形很大程度上影响了样线的选取。在已有的许多研究中所采用的方法并

不能严格满足这两个基本原则。不满足样线设置的随机性,例如主观地依已有的供人类行走的路径设置样线,数据不具备代表性,样线的结果无法推广到整个调查区域;由于地形限制,设置样线不足,不能很好地满足重复性则容易使数据受到较大的随机误差影响。例如我国白头叶猴、黑叶猴分布的喀斯特石山地区,石山广布,密林藤蔓交错,地图上笔直的样线很可能会使调查者行走艰难,因此很难做到设置完美的样线并保证其代表性。总体来说,样线法适合于地形平坦、动物个体或群体分布较为均匀的区域。为解决调查样线的随机性与重复性,实际研究中常常采用系统分层的方法,比如将样地分为两块,在地形复杂的区域可适当减少样线数,在更为易行的区域增加样线数等。Buckland等提出,在密林等生境中设置样线时,为了保障随机性,常常要提前清除样线上的植被以便调查者通行(Buckland *et al.*, 2010b)。植被清除工作应本着造成最小影响的原则提前进行,以使得调查进行时对动物原本生活状态的干扰降到最低;同时小的障碍物在调查时可以灵活地绕开,即调查者不一定严格地在样线上行进,只需要保证动物个体或群体中心到样线的垂直距离得到准确记录,样线上或附近的个体或群体被全部准确记录这两点即能达到较好的效果。

样线法的具体操作中目标到样线的垂直距离或到观测者的直线距离两者均可以作为指标,后者更容易测量且在众多非人灵长类调查模型中使用。然而Buckland等指出,目标—观察者距离(AOD)存在理论缺陷(Buckland *et al.*, 2010a)。一方面使用AOD在分析时容易导致截断距离的选择带有较大主观性,其更为根本的缺陷则是直接使用AOD为变量将使得探测概率函数与概率密度函数的形式不一致。因此Buckland等(2010a)推荐采用标准的记录动物体到样线的垂直距离的方法,此垂直距离可以通过AOD与观测角度计算得到。在对群体使用样线法时,应该选取群体中心或是选取最近个体作为测距对象亦值得商榷。如能准确测得群体的位置与群体大小,获取群体中心的位置,此为最优选择。但在多数情况下,上述条件较难满足,如果采用最近个体作为测量距离对象,则通常会导致种群密度被高估(Buckland *et*

al., 2010a)。

2.3 调查指标与换算关系

样线法调查时并非一定要求记录动物个体。当动物习性隐秘难以被观测和记录时,与动物相关的指标也可以作为样线法的观测指标,并与记录动物个体时相似,需记录其数量和到样线的距离。可选取的指标通常包括粪便(广泛运用于各类群包括非人灵长类),鸟类的羽毛、叫声、巢,有蹄类的足迹、卧迹等等。这就要求通过独立的调查获得所选取的指标与动物个体数之间的换算系数,比如单个鸟类个体鸣叫的频率(许龙等, 2003),或者是有蹄类的单个个体足迹链的研究(陈华豪, 1989),非人灵长类的巢穴作为指标进行调查(Piel *et al.*, 2015)。

2.4 实例分析

Bapureddy等(2015)对印度西高止山脉的3种非人灵长类动物进行数量调查时,首次在该区域采取了样线法。调查者在避开人类干扰的雨林中随机选取8条样线,并依据重复的原则进行了1次标准的样线法调查实践。调查者把实验结果与附近其他保护区已有的数据进行对比,以评估样线法的可行性,提出在当地样线法是一种可行的调查方法。

另一个运用典型的痕迹样线法对坦桑尼亚的黑猩猩(*Pan troglodytes*)进行数量调查(Piel *et al.*, 2015)。研究者根据黑猩猩数量少、不易见、与夜宿巢穴联系紧密的特点采用了对巢穴进行调查的方法,记录了包括巢穴数量、巢穴建立时间、巢穴到样线的垂直距离等数据,用Distance 6.0软件进行处理,并根据以往研究,使用特定的“巢穴日均增加数”以及“巢穴平均衰减时间”两个参数计算出巢穴与黑猩猩数量的换算系数,从而给出对种群密度的估计。从黑猩猩的例子中可以看出,样线法研究被广泛采用,选择指标很重要。研究依赖于人们对黑猩猩巢穴情况的已有了解,方可得出较为准确的换算系数。因此设定调查指标时,需充分考虑易见程度以及能否给出有效的换算系数。而在调查和数据处理中,如何选取恰当的探测函数模型亦至关重要。

3 样点法

3.1 方法简介

样点法实际上是变形的样线法,同为距离抽

样调查的具体实施方法之一,多运用于森林鸟类的调查研究(吴飞和杨晓君,2008),对昼行性非人灵长类动物的调查也有一定的指导意义。样点法类型多样,通常可分为固定半径与不固定半径两种。不固定半径法,需要记录每一个个体到观察者的距离,并与上文提到的样线法一样用Distance软件处理数据;对于固定面积的方法而言,则无需测量距离,而是提前设定半径(如森林中常为25 m),只记录观察半径内观察到的动物个体,进而统计各样点或者一个样点重复的观测记录,用总数除以面积得到密度。与样线法相同,样点法也需要在设计时满足关键假设,如进行鸟类调查时要求观察范围内的鸟类都能被及时发现;鸟类不会主动接近或躲避调查者;一定时间内尽量无动物个体移动到观察范围之外并且外部个体也没有进入观察范围等等。实施样点法需要考虑的问题包括样点的系统选取、样点的数量设置、每一个样点的观察范围、每一个样点的调查持续时间和不同季节或一天内不同时段的可能影响等。

3.2 优点和局限性

样点法较样线法能更好地适应于各种较为复杂的地形地貌,尽可能地满足随机性、重复性的原则,系统地选取样点。样点法更加适合复杂和斑块化生境的调查工作。与样线法相同,周期相对较短的调查工作受多种不确定性因素影响,如调查人员的熟练程度、判断准确程度等等,这些都会削弱样点法得到结果的可信度。同时,相对样线法而言,样点法需要设置更多的样点,样点间移动的过程也会花费大量的时间。

3.3 实例分析

对屋久岛的日本猕猴进行调查的研究中,因为地形原因无法使用样线法,设计了样点法与跟踪猴群结合的计数方法(Hanya *et al.*, 2003)。研究中将调查区域划分成一定边长的方格,一组调查者在方格中定点记录调查时间内记录到的猴群数;另外一组有经验的调查人员同步选取了4个猴群进行追踪,猴群到各样点的距离由这组人员进行估计。多日的重复调查获得的数据同样被用来拟合侦测函数进而计算区域内猕猴群体的密度(即群体数除以面积,非种群密度)。研究人员将得到的结果与长期的巢域调查结果对比,发现这种新方法的可信度较高。从这个研究中可以看出,样点法

在非人灵长类调查中也可以得到很好地应用,关键之一是如何得到更合理的侦测函数。因此结合其他方法,因地制宜地改进样点法进行相关调查可以获得理想的结果。

4 叫声回放样线法

4.1 方法简介

近年来,越来越多的研究者利用非人灵长类叫声的特点进行种群密度和数量的调查,包括巴西的黑额伶猴(*Callicebus nigrifrons*) (Gestich *et al.*, 2016), 秘鲁的安第斯伶猴(*Callicebus oenanthe*) (Aldrich, 2008; van Kuijk *et al.*, 2016), 印度尼西亚的白须长臂猿(*Hylobates albibarbis*) (Cheyne *et al.*, 2008), 危地马拉的黑吼猴(*Alouatta pigra*) 和黑掌蜘蛛猴(*Ateles geoffroyi*) (Estrada *et al.*, 2004) 等,在调查中,这些非人灵长类对叫声录音回放刺激发出叫声回应,将叫声的回应作为样线法当中的探测函数进行统计,用以估计该种群的数量或者密度。

4.2 优点和局限性

对于较难观察到实体但叫声较频繁的非人灵长类动物可以采用。因为该方法只是将观察到的个体数改为通过叫声识别出的个体数量作为探测函数进行模型统计,因此样线法的局限性在使用此方法时同样存在,并且在实施叫声回放调查时,要考虑叫声播放对非人灵长类产生的影响,尽量降低有可能造成的压力。此外,尽量选择地貌较为平坦,易于声音传播的地区,并远离河流等,以减少环境噪音。叫声录音保持清楚、自然、无杂音,尽可能保持在物种天然叫声的平均水平。调查前,需要做预实验以保证有效,实验地尽量远离调查地以避免非人灵长类动物对录音习惯化而导致的声反射行为降低或失效。回放装置尽量覆盖全部的调查区域,尽管有时很难做到,播放距离最好设置在非人灵长类对叫声发出反应的最大距离,若无反应,可逐渐缩短距离直到有反应。此外,还要考虑录音播放的方向性,所以最好设定一个可反应的圆形,将扬声器放置在中心位置。实验每天不能多次进行,并且尽量不连续进行,最好相隔几天,以防止动物习惯化而失效(Gestich *et al.*, 2016)。

4.3 实例分析

对巴西黑额伶猴的调查使用了叫声回放的方

法 (Gestich *et al.*, 2016), 制定了系统的方法定位研究地区所有猴群及其数量, 并制定了较为规范的操作步骤, 值得参考。黑额伶猴个体较小, 生活在南美的热带森林中, 成年配对个体间会发出鸣叫, 有时其后代也会加入保卫领地的鸣叫。该研究表明叫声回放对于鸣叫的非人灵长类动物种群密度估算是简单有效的。

5 红外相机调查法

5.1 方法简介

20 世纪 90 年代以来, 红外相机技术在野生动物特别是大中型兽类和鸟类的多样性监测中逐渐得到了广泛地应用 (李晟, 2020), 已成为国内外兽类监测研究的主要技术手段 (Li *et al.*, 2018) 和兽类编目的重要手段之一 (李晟等, 2016), 尤其是在新物种的发现上具有很大的潜力 (Li *et al.*, 2015)。其核心部件为红外线或热传感器, 在探测到野生动物从前方经过时, 能在无人操作的情况下自动拍摄野生动物的照片或视频。基于红外相机拍摄率计算得到相对多度指数 (Relative abundance index, RAI), 但需要注意的是 RAI 不能代表绝对的种群数量 (李晟等, 2014)。仅以 RAI 反映种群数量, 仍需要谨慎地验证 RAI 与种群密度的相关性 (陈立军等, 2019)。但随着红外相机技术的发展, 分辨率的提高, 对某些兽类可以进行个体识别, 结合标记—重捕模型可进行更为准确的种群密度的计算 (肖文宏等, 2019)。

对大量的非人灵长类照片数据进行个体识别通常需要花费一定的人力和时间成本。随着近年来机器学习技术的进步, 研究开发出了非人灵长类脸部识别的 AI 系统 (Guo *et al.*, 2020)。研究者利用计算机深度学习技术, 为 AI 识别系统提供了 41 种非人灵长类, 上千只个体, 超过 10 万张照片的训练集, 完成训练后系统能探测图片和视频中的非人灵长类脸部并进行个体识别, 经检验其准确率可达 94.1%, 处理速度达每秒 31 张脸部照片。结合较为先进的空间标记—重捕模型, AI 个体识别技术为利用红外相机进行种群调查提供了丰富的可能性。

5.2 优点和局限性

红外相机监测技术对于栖息地类型复杂、隐秘怕人的动物具有优势, 弥补了样线法对于这类动物难以调查的不足, 也适合在夜间进行野生动

物调查。红外相机调查法对野外工作人员的要求相对较低, 红外相机可以在野外持续工作, 不惊扰动物, 数据量大并且可留存复核, 物种鉴定较为准确, 所获得的数据可以进行标准化的统计分析。但是红外相机对小型兽类有局限性, 在潮湿或高温环境中工作不稳定, 调查初期需要大量布设相机, 投入成本高, 并且在野外经常会发生相机丢失或被野生动物等损坏的情况。

5.3 实例分析

非人灵长类新物种白颊猕猴 (*Macaca leucogenys*) 的发现和描述中, 红外相机记录了大量影像信息, 发挥了重要的作用。长期追踪未被习惯化的非人灵长类群体难度较大, 成本较高, 红外相机则能帮助研究人员节约大量的时间和人力成本。在西藏自治区墨脱县境内布设了 31 台红外相机, 共获取 685 张猕猴属照片, 结合野外直接观察获取的照片共计 738 张。这些照片被用于分析不同年龄段、不同性别白颊猕猴的毛色差异和形态特征, 并与猕猴属其他种进行对比, 最终从形态上提出白颊猕猴为一新物种 (Li *et al.*, 2015)。

利用红外相机在高黎贡山对兽类进行初步调查时, 共监测 41 个相机位点, 调查结果中灵长目动物的相对丰富度指数最高, 记录到了熊猴 (*Macaca assamensis*) 和新近在我国发现有分布的怒江金丝猴, 并获得了它们的日活动节律峰值 (陈奕欣等, 2016)。在四川省白水河保护区布设 70 台红外相机, 用于研究川金丝猴 (*Rhinopithecus roxellana*) 的地面活动行为和年龄、性别比例 (张龙等, 2019); 在陕西省楼观台实验林场对川金丝猴进行数量调查时, 采用了样线法与红外相机调查法相结合的策略, 利用同一时间段不同相机的捕获情况区分不同个体, 辅助样线法进行种群数量统计 (钟凌等, 2018)。

红外相机调查法因其特点, 在夜行性非人灵长类调查中发挥了一定的作用。夜行性非人灵长类因夜间活动、体型相对较小和性情隐蔽怕人等因素, 种群调查较为困难。在云南省屏边县大围山自然保护区周边布设红外相机调查兽类资源, 得到倭蜂猴 (*Nycticebus pygmaeus*) 相对丰富度为 2.63%, 蜂猴 (*Nycticebus bengalensis*) 相对丰富度为 5.26%, 指出保护区周边两种蜂猴属物种的密度低, 亟待制定有针对性的保护措施 (余梁哥等, 2013)。

6 遗传调查法

6.1 方法简介

遗传调查法通过非损伤性采集非人灵长类的毛发和粪便等,运用分子手段提取DNA并选取分子标记,帮助研究者构建非人灵长类种群的遗传谱系,分析濒危物种小种群内的近交情况和种群间的基因交流,计算非人灵长类种群内的性别比例,回溯种群历史等(Plumptre *et al.*, 2013)。利用近年来发展迅速的标志—重捕模型,通过微卫星等分子手段对动物进行个体识别并“标记”,可快速获得研究区域内非人灵长类动物种群数量的估计值(Chang *et al.*, 2012; Plumptre *et al.*, 2013; Arandjelovic and Vigilant, 2018)。遗传调查法正成为一种新兴的非人灵长类种群数量调查方法(Guschanski *et al.*, 2009)。遗传调查法对昼行性非人灵长类和夜行性非人灵长类均适用。

6.2 优点和局限性

对于性情隐蔽,不易于跟踪观察和直接计数的非人灵长类,可以采集粪便和毛发样品进行研究,尤其是分布范围狭窄,数量稀少的濒危非人灵长类,尽可能在其所有活动区域采集粪便或毛发,运用分子标记进行个体鉴定的方法,通常可获得区域内的最少个体数。如果是粪便样本,对样本的识别和新鲜度有一定的要求,特别是雨季时对粪便的采集要快速,以免动物DNA的流失。种群数量稀少的非人灵长类动物的粪便和毛发的获取会更加困难,特别是小型非人灵长类动物,粪便小不易发现,通过寻找动物的夜宿点和经常休息停留的区域可能更容易获得粪便和毛发样品。

6.3 实例分析

何丽等(2010)对我国特有种川金丝猴,通过线粒体DNA片段和微卫星位点等分子标记进行遗传学研究,指出神农架保护区和长青保护区的川金丝猴种群在线粒体基因与核基因上均具有较丰富的遗传多样性;长青保护区的多个川金丝猴种群间存在丰富的基因交流,尚未因道路、河流等生态因子产生阻隔,成功回溯了历史上的种群扩张事件等。此研究虽然未给出两个保护区川金丝猴种群数量,但其结果对更全面地了解当地非人灵长类种群并制定相应的保护措施非常有益。

Chang 等(2012)在神农架保护区采集337份川金丝猴粪便样品,利用16个微卫星位点进行个体

鉴定,共识别出153只川金丝猴个体,代表了采样区域内川金丝猴的最小个体数;研究人员进一步运用标志—重捕模型,给出了3种数学模型下保护区内的川金丝猴数量和密度的估计值和置信区间。此研究是利用遗传调查法进行非人灵长类种群数量调查的有益尝试。为获取更精确的数量估计,通常建议采集3~4倍于研究区域内个体数(预测值)的粪便样本进行分子标记和个体鉴定,而较长研究周期内的多次采样亦能提高标志—重捕模型对种群数量估计值的精确度(Arandjelovic and Vigilant, 2018)。可以预见,随着标志—重捕模型的进一步完善和遗传学方法成本的降低,遗传调查法将在未来的非人灵长类数量调查中发挥更加重要的作用。

对乌干达布温迪森林的山地大猩猩(*Gorilla beringei beringei*)进行种群数量调查时,采用了传统的“全扫描”计数法,扫描统计区域内大猩猩种群夜宿点筑巢数和粪便数以推断种群数量;同时也采用了遗传调查法,对每个夜宿点采集的粪便样品提取DNA,选取微卫星分子标记进行个体鉴定(Guschanski *et al.*, 2009)。调查结果显示,传统的以筑巢数和粪便数计数为基础的方法估计得到的种群数量比结合遗传调查法估计得到的数量高10.1%。研究者分析认为,大猩猩群中部分个体可能在夜宿点筑不止一个巢,且在野外调查中存在重复计数不同夜宿点的同一大猩猩群的可能性,因此传统的调查方法可能会高估区域内的种群数量。此研究指出,传统的野外调查结合运用遗传调查法,能在有限的成本提高下增加数量估计的准确性,同时亦能提供性别比例、群体内部关系、扩散规律等额外信息,尤其适用于珍稀且习性隐蔽的非人灵长类动物数量调查。

7 无人机调查法与热成像技术的应用

无人机作为近年来新兴的技术被越来越多地运用于野生动物监测、调查与计数中。搭载传统照相机的无人机通常运用于开阔而植被遮挡较少的环境中,如有蹄类调查(杨帆等, 2018)和集群筑巢或栖息的大型鸟类调查等。李文华等(2019)在广西黑叶猴的种群数量调查中,使用无人机对其位于山顶和崖壁上的夜宿地进行了观察,并对使用痕迹的新鲜程度进行记录。在渠楠保护小区的白头叶猴种群数量调查中,使用无人机对人类

难以攀登的喀斯特石山采用720全景和正摄影像进行调查,结果约为240只白头叶猴,特别是可以拍摄到平时观察不到的在山顶活动的白头叶猴的情况,并制作了白头叶猴分布的基础地图(宋晴川,未发表数据)。而在地形复杂、植被茂密的地区,传统的照相机很难捕获到林冠层以下的动物活动情况。搭载热成像照相机的无人机技术提供了一种实用的解决方法。He等(2020)利用搭载热成像照相机的无人机技术,在秦岭进行了川金丝猴种群调查的尝试。研究结果显示,对无人机拍摄到的川金丝猴群进行计数,总个体探测率为地面调查所获得的较为准确的川金丝猴数量的60%~70%,且探测率较为稳定。研究者指出,搭载热成像照相机的无人机技术相比于传统的地面调查技术,具有覆盖面广、穿透能力强、探测率相对稳定和经济快速等优点,且能获得一定时间内非人灵长类群体和个体的准确空间位置。

结合传统的地面调查研究,获得热成像无人机在特定区域对特定物种的探测率,将会是从无人机调查结果推算出较为准确的种群数量估计值的关键,通过此转换关系,利用无人机技术调查快速、覆盖面广的特点,为在复杂环境中快速调查非人灵长类种群数量提供了可能性。此外,这类调查宜在冬季日落后进行,较低的环境气温和光线条件能使恒温动物很好地与周边环境区分,热成像的效果较佳。搭载热成像照相机的无人机技术除了林下的昼行性非人灵长类以外,在夜行性非人灵长类的种群调查中亦有着广泛的应用前景。

8 小结与展望

用于统计非人灵长类动物种群数量的方法仍然含有诸多可变因素,因此结果也有一定的不确

定性(Plumptre and Cox, 2006),使用某一方法重复调查或者综合多种调查方法的结果或许可以弥补这一不足。非人灵长类动物的调查方法各有千秋(表1),具有不同的适用条件,应结合具体情况选用。逐个计数法在我国非人灵长类调查中发挥了重要作用,我国的非人灵长类动物种类繁多,栖息地相对集中且多为山地,有当地工作人员参与为调查提供了便利条件,也反映了我国非人灵长类动物从某种程度上得到了有效的监测。随着红外相机技术的发展,红外相机的使用越来越方便、高清、低成本,红外相机调查法未来在包括非人灵长类动物在内的生物多样性调查中具有广阔的应用前景。红外相机数据平台的相继建立(李晟, 2020),不同研究地区同一物种的相对多度指数易于进行比较研究;同一地区红外相机监测数据的长期积累,对于该地区动物种群数量的变化过程的认识也将更全面。计算机面部识别系统(Guo *et al.*, 2020)应用在红外相机调查中对非人灵长类进行个体识别是一个重要突破。遗传调查法因遗传学研究技术的飞速发展,无损伤取样、不惊扰动物等优势必将发挥巨大的作用。近年来,无人机技术的应用,在非人灵长类动物调查中也有了新的尝试,除了对生活在开阔地带的物种进行调查以外,对于难以在地面进行观察的物种和区域得以快速获得有效数据(李文华等, 2019; 宋晴川, 未发表数据),热成像技术的应用为林下动物使用无人机调查成为可能(He *et al.*, 2020)。未来,几种方法的有效结合,使我们对非人灵长类动物的种群状况从历史到现状、从平面到立体空间、从微观到宏观多层次多维度进行深入研究成为可能,保护管理也将更加科学完善。

表1 非人灵长类种群数量调查方法的特点、适用条件和获得参数

Table 1 Features, applicable conditions and parameters of non-human primate population survey methods

调查方法 Survey methods	特点和优势 Features and advantages	适用条件 Conditions applied	获得参数 Parameters acquired
逐个计数法 Total count	通常有当地居民或一线人员长期参与监测,数量较为准确 Long-term efforts of the local surveyors, results relatively accurate	对种群活动范围有所了解或者可跟踪目标群 Animal's activity pattern or home range known well; groups easy to follow	较为精确的个体数量范围 Relatively accurate range of population size
样线法 Line transect distance sampling	系统抽样,结合数学模型和软件在短期内给出估值 A systematic sampling method incorporating models and softwares, yielding estimates with relatively short-term survey	需满足关键假设,动物分布较为均匀 Key assumptions need to be fulfilled, with animals evenly distributed	种群密度估计值与精度估计 Population density estimates with confidence intervals

续表 1 Continued from table 1

调查方法 Survey methods	特点和优势 Features and advantages	适用条件 Conditions applied	获得参数 Parameters acquired
样点法 Point count distance sampling	系统抽样, 更适合复杂和斑块化地形 A systematic sampling method for complicated and patched landscape	需满足特定假设和随机性、重复性原则 Key assumptions need to be fulfilled, as well as principles of randomization and replication	种群密度估计值与精度估计 Population density estimates with confidence intervals
叫声回放样线法 Line transect distance sampling with playback	适用于较难观察但叫声频繁的灵长类动物 For elusive primates that are difficult to observe but contact with calls frequently	灵长类叫声频繁, 对回放有反应, 亦需满足样线法假设 Assumptions for distance sampling need to be fulfilled; primates frequently call and should react to playback used	种群密度估计值与精度估计 Population density estimates with confidence intervals
红外相机调查法 Infra-red camera trap survey	调查人员无需在场, 可探测隐蔽物种和夜间工作, 有利于新种的发现; 红外相机数据平台相继建立有利于不同地区同一物种的相对多度指数的比较研究 Capable of working 24 hours with no researcher present; may detect elusive species and potential new species; RAI could be compared across camera trap data platform	调查对象活动范围易于被相机拍摄到 Animal's activity should be detected by camera traps (relatively close to the ground)	基于探测频次计算得到的相对多度指数 Relative abundance index (RAI) calculated based on detection frequencies
遗传调查法 Genetic methods of surveying	无损伤采样, 构建遗传结构、获取性别比例, 结合标志—重捕模型估计种群数量 A non-invasive sampling method; capable of constructing genetic structure of populations, calculating sex ratio, and estimating population size with mark-recapture models	适用面较广, 可获得遗传结构等种群信息 Could be applied with other methods in various conditions	种群数量估计、置信区间; 遗传多样性, 性别比例, 最小种群数量等 Estimates of population size with confidence intervals; genetic diversity, sex ratio, minimum population size, etc.
无人机调查法 Survey by unmanned aerial vehicle	快速获得开阔地带或山顶、树冠等地面难以观察的动物数量和活动位置, 以及夜宿洞使用情况和山顶地形等 A method capable of rapidly acquiring the number and position of animal groups in open landscape or on mountain summits or crown canopy. In addition, it facilitates the survey of overnight-staying sites/caves and the topology of mountain summits	适合无人机飞行的开阔地带、山顶、山腰、树冠上空; 结合热成像技术可探测林下的动物 Can be applied in open landscapes, above mountain summits, hillsides, or crown canopy. When applied with thermal imaging, capable of detecting animals in forest understory	群体或个体的准确位置和数量 Accurate number and position of animal groups and individuals

致谢: 感谢北京大学生命科学学院对灵长类野外实习课程给予的支持。感谢质兰公益基金创始人兼秘书长张颖溢女士和广西渠楠保护小区的支持。

参考文献:

- Aldrich B C, Molleson L, Nekaris K A I. 2008. Vocalizations as a conservation tool: an auditory survey of the Andean titi monkey *Callicebus oenanthe* Thomas, 1924 (Mammalia: Primates: Pitheciidae) at Tarangue, Northern Peru. *Contributions to Zoology*, **77** (1): 1–6.
- Arandjelovic M, Vigilant L. 2018. Non-invasive genetic censusing and monitoring of primate populations. *American Journal of Primatology*, **80** (3): e22743.
- Bapureddy G, Santhosh K, Jayakumar S, Kumara H N. 2015. Estimate of primate density using distance sampling in the evergreen forests of the central Western Ghats, India. *Current Science*, **108** (1): 118–123.
- Buckland S T, Plumptre A J, Thomas L, Rexstad E A. 2010a. Design and analysis of line transect surveys for primates. *International Journal of Primatology*, **31** (5): 833–847.
- Buckland S T, Plumptre A J, Thomas L, Rexstad E A. 2010b. Line transect sampling of primates: can animal-to-observer distance methods work? *International Journal of Primatology*, **31** (3): 485–499.
- Chang Z F, Liu Z J, Yang J Y, Li M, Vigilant L. 2012. Noninvasive genetic assessment of the population trend and sex ratio of the Shennongjia population of Sichuan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus roxellana*). *Chinese Science Bulletin*, **57** (10): 1135–1141.
- Cheyne S M, Thompson C J H, Phillis A C, Hill R M C, Limin S H. 2008. Density and population estimate of gibbons (*Hylobates albibarb*) in the Sabangau catchment, Central Kalimantan, Indonesia. *Primates*, **49**: 50–56.
- Chapman C A. 2018. A road for a promising future for China's primates: The potential for restoration. *Zoological Research*, **39** (4): 244–248.
- Danielsen F, Burgess N D, Balmford A. 2005. Monitoring matters: examining the potential of locally-based approaches. *Biodiversity & Conservation*, **14** (11): 2507–2542.
- Estrada A, Luecke L, van Belle S, Barrueta E, Meda M R. 2004. Survey of black howler (*Alouatta pigra*) and spider (*Ateles geoffroyi*) monkeys in the Mayan sites of Calakmul and Yaxchilan, Mexico and Tikal, Guatemala. *Primates*, **45**: 33–39.
- Estrada A, Garber P A. 2022. Principal drivers and conservation solutions to the impending primate extinction crisis: introduction to the special issue. *International Journal of Primatology*, **43**: 1–14.

- Fan P F, He K, Chen X, Ortiz A, Zhang B, Zhao C, Li Y Q, Zhang H B, Kimock C, Wang W Z, Groves C, Turvey S T, Roos C, Helgen K M, Jiang X L. 2017. Description of a new species of Hoolock gibbon (Primates: Hylobatidae) based on integrative taxonomy. *American Journal of Primatology*, **79** (5): e22631.
- Fan P F, Ma C. 2018. MaExtant primates and development of primatology in China: publications, student training, and funding. *Zoological Research*, **39** (4): 249–254.
- Fan P F, Zhang L, Yang L, Huang X, Shi K C, Liu G Q, Wang C H. 2022. Population recovery of the critically endangered western black crested gibbon (*Nomascus concolor*) in Mt. Wuliang, Yunnan, China. *Zoological Research*, **43** (2): 180–183.
- Gestich C C, Caselli C B, Nagy-Reis M B, Setz E Z F, da Cunha R G T. 2016. Estimating primate population densities: the systematic use of playbacks along transects in population surveys. *American Journal of Primatology*, **79**: e22586.
- Guo S T, Xu P F, Miao Q, Shao G F, Chapman C A, Chen X J, He G, Fang D Y, Zhang H, Sun Y W, Shi Z H, Li B G. 2020. Automatic identification of individual primates with deep learning techniques. *iScience*, **23** (8): 101412.
- Guo Y, Grueter C C, Lu J. 2022. Allomaternal care and ‘adoption’ in an edge-of-range population of Taihangshan macaques in northern China. *Current Zoology*. DOI: 10.1093/ac/zoac027
- Guschanski K, Vigilant L, McNeillage A, Gray M, Kagoda E, Robbins M M. 2009. Counting elusive animals: comparing field and genetic census of the entire mountain gorilla population of Bwindi Impenetrable National Park, Uganda. *Biological Conservation*, **142**: 290–300.
- Hanya G, Yoshihiro S, Zamma K, Kubo R, Takahata Y. 2003. New method to census primate groups: estimating group density of Japanese macaques by point census. *American Journal of Primatology*, **60** (2): 43–56.
- He G, Yang H T, Pan R L, Sun Y W, Zheng P B, Wang J H, Jin X L, Zhang J J, Li B G, Guo S T. 2020. Using unmanned aerial vehicles with thermal-image acquisition cameras for animal surveys: a case study on the Sichuan snub-nosed monkey in the Qinling Mountains. *Integrative Zoology*, **15** (1): 79–86.
- Hulme D, Murphree M. 2001. *African Wildlife and Livelihoods: The Promise and Performance of Community Conservation*. Oxford: James Currey Ltd.
- Keeping D, Burger J H, Keitsile A O, Gielend M, Mudongo E, Wallgren M, Skarpe C, Lee Foote A. 2018. Can trackers count free-ranging wildlife as effectively and efficiently as conventional aerial survey and distance sampling? Implications for citizen science in the Kalahari, Botswana Derek. *Biological Conservation*, **223**: 156–169.
- Li B G, Li M, Li J H, Fan P F, Ni Q Y, Lu J Q, Zhou X M, Long Y C, Jiang Z G, Zhang P, Huang Z P, Huang C M, Jiang X L, Pan R L, Gouveia S, Dobrovolski R, Grueter C C, Oxnard C, Groves C, Estrada A, Garber P A. 2018. The primate extinction crisis in China: immediate challenges and a way forward. *Biodiversity and Conservation*, **27**: 3301–3327.
- Li C, Zhao C, Fan P F. 2015. White-cheeked macaque (*Macaca leucogenys*): a new macaque species from Medog, southeastern Tibet. *American Journal of Primatology*, **77** (7): 753–766.
- Li X Y, Bleisch W V, Jiang X L. 2018. Using large spatial scale camera trap data and hierarchical occupancy models to evaluate species richness and occupancy of rare and elusive wildlife communities in southwest China. *Diversity and Distributions*, **24** (11): 1560–1572.
- Liu R, Amato K, Hou R, Gomez A, Dunn D W, Zhang J, Garber P A, Chapman C A, Righini N, He G, Fang G, Li Y H, Li B G, Guo S T. 2022. Specialized digestive adaptations within the hindgut of a colobine monkey. *The Innovation*, **3** (2): 100207.
- Ma C, Luo Z H, Liu C M, Orkin J D, Xiao W, Fan P F. 2015. Population and conservation status of indochinese gray langurs (*Trachypithecus crepusculus*) in the Wuliang Mountains, Jingdong, Yunnan, China. *International Journal of Primatology*, **36** (4): 749–763.
- Napier J R, Napier P H. 1994. *The Natural History of the Primates*. Cambridge: The MIT Press, 10.
- Nekaris K A I, Blackham G V, Nijman V. 2008. Conservation implications of low encounter rates of five nocturnal primate species (*Nycticebus* spp.) in Asia. *Biodiversity and Conservation*, **17** (4): 733–747.
- Piel A K, Cohen N, Kamenya S, Ndimuligo S A, Pintea L, Stewart F A. 2015. Population status of chimpanzees in the Masito–Ugalla Ecosystem, Tanzania. *American Journal of Primatology*, **77** (10): 1027–1035.
- Plumptre A J, Cox D. 2006. Counting primates for conservation: primate surveys in Uganda. *Primates*, **47**: 65–73.
- Plumptre A J, Sterling E J, Buckland S T. 2013. *Primate Census and Survey Techniques*. *Primate Ecology and Conservation: A Handbook of Techniques*. Oxford: Oxford University Press.
- Qi X G, Garber P A, Ji W H, Huang Z P, Huang K, Zhang P, Guo S T, Wang X W, He G, Zhang P, Li B G. 2014. Satellite telemetry and social modeling offer new insights into the origin of primate multilevel societies. *Nature Communications*, **5**: 5296.
- Strier K B. 2017. *Primate Behavioral Ecology*. London and New York: Routledge.
- Thomas L, Buckland S T, Rexstad E A, Laake J L, Strindberg S, Hedley S L, Bishop J R B, Marques T A, Burnham K P. 2010. Distance software: design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size. *Journal of Applied Ecology*, **47** (1): 5–14.
- van Kuijk S M, Garcia-Suikkanen C, Tello-Alvarado J C, Veermer J, Hill C M. 2016. Estimating population density of the san martin titi Monkey (*Callicebus oenanthe*) in Peru using vocalisations. *Folia Primatologica*, **86**: 525–533.
- Xia D, Li J, Matheson M D, Sun L, Sun B, Zhou Y. 2012. First occurrence of twins in provisioned free-ranging Tibetan macaques (*Macaca thibetana*) at Huangshan, China. *Primates*, **53**: 1–5.

- Zhao X, Garber P A, Li M. 2021. Alleviating human poverty: a successful model promoting wildlife conservation in China. *Conservation Science and Practice*, **3** (10): e511.
- Zhou X M, Wang B S, Pan Q, Zhang J B, Kumar S, Sun X Q, Liu Z J, Pan H J, Lin Y, Liu G J, Zhan W, Li M Z, Ren B P, Ma X Y, Ruan H, Cheng C, Wang D W, Shi F L, Hui Y Y, Tao Y J, Zhang C L, Zhu P F, Xiang Z F, Jiang W K, Chang J, Wang H H, Cao Z S, Jiang Z, Li B G, Yang G, Roos C, Garber P A, Bruford M W, Li R Q, Li M. 2014. Whole-genome sequencing of the snub-nosed monkey provides insights into folivory and evolutionary history. *Nature Genetics*, **46**: 1303–1310.
- 王相龙, 彭东, 申剑, 张宏, 朱蒙恩, 潘炳锐, 郑红伟, 周江, 黎大勇. 2021. 雅鲁藏布江加查峡谷西藏猕猴的种群数量及保护现状研究. 普洱学院学报, **37** (6): 1–4.
- 王振兴, 王爱龙, 黄恒连, 蒙育宁, 梁霁鹏, 农登攀, 蒋迎红, 李友邦. 2014. 广西崇左白头叶猴国家级自然保护区及周边区域黑叶猴种群数量与分布. 四川动物, **33** (4): 487–492.
- 尹峰, 梦梦, 刘定震, 周岐海, 黄乘明. 2015. 我国非人灵长类野外生态学研究现状与展望. 林业资源管理, **4**: 1–6.
- 邓怀庆, 周江. 2018. 贵州野钟保护区黑叶猴种群数量、分布及夜宿洞穴调查. 兽类学报, **38** (4): 420–425.
- 龙勇诚, 程斌, 谢建国, 梁霁鹏, 程远. 2016. 灵长类: 人类失联太久的表亲. 森林与人类, **7**: 12–27.
- 田军东. 2011. 野生太行山猕猴的种群生态和社会结构. 郑州: 郑州大学硕士学位论文.
- 冉文忠. 2003. 野生白头叶猴的现状: 分布、数量、栖息地利用和种群生存力分析. 北京: 北京大学博士学位论文.
- 付文, 任宝平, 林建忠, 栾科, 王朋程, 王宾, 黎大勇, 周岐海. 2021. 济源太行山猕猴种群数量和保护现状. 广西师范大学学报, **39** (1): 45–52.
- 江海声, 刘振河, 袁喜才, 王韩生. 1988. 海南岛南湾半岛猕猴 (*Macaca mulatta*) 种群数量动态及分布. 生态学报, **1**: 86–94.
- 许龙, 张正旺, 丁长青. 2003. 样线法在鸟类数量调查中的运用. 生态学杂志, **22** (5): 127–130.
- 李文华, 宋晴川, 黄蓉, 赵家新, 李友邦, 周岐海. 2019. 广西恩城保护区黑叶猴种群数量和保护现状. 兽类学报, **39** (6): 623–629.
- 李光松, 陈奕欣, 孙文莫, 王新文, 黄志旁, 李延鹏, 向左甫, 丁伟, 肖文, 李明. 2014. 中国怒江片马地区怒江金丝猴种群动态及社会组织初探. 兽类学报, **34** (4): 323–328.
- 李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云. 2014. 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. 生物多样性, **22** (6): 685–695.
- 李晟, 王大军, 卜红亮, 刘小庚, 靳彤. 2016. 四川省老河沟自然保护区兽类多样性红外相机调查. 兽类学报, **36** (3): 282–291.
- 李晟. 2020. 中国野生动物红外相机监测网络建设进展与展望. 生物多样性, **28** (9): 1045–1048.
- 杨业勤, 雷孝平, 杨传东, 孙敦渊, 陈继顺, 何汝态, 谭长芬, 张维勇. 2001. 黔金丝猴种群数量的调查研究. 野生动物生态与管理学术讨论会.
- 杨帆, 邵全琴, 郭兴健, 李愈哲, 王东亮, 张雅娴, 汪阳春, 刘纪远, 樊江文. 2018. 玛多县大型野生食草动物种群数量对草畜平衡的影响研究. 草业学报, **27** (7): 13.
- 肖文宏, 胡力, 黄小群, 肖治术. 2019. 基于标记—重捕模型开展野生动物红外相机种群监测的方法及案例. 生物多样性, **27** (3): 9.
- 吴飞, 杨晓君. 2008. 样点法在森林鸟类调查中的运用. 生态学杂志, **27** (12): 2240–2244.
- 何丽. 2010. 川金丝猴 (*Rhinopithecus roxellana*) 遗传学与栖息地分析. 石河子: 石河子大学博士学位论文.
- 余梁哥, 陈敏杰, 杨士剑, 李学友, 师蕾. 2013. 利用红外相机调查屏边县大围山倭蜂猴、蜂猴及同城兽类. 四川动物, **6**: 814–818.
- 张龙, 邓玥, 钟雪, 白文科, 周材权, 王彬. 2019. 基于红外相机技术的川金丝猴地面活动监测. 三峡生态环境监测, **4** (3): 68–73.
- 陈立军, 肖文宏, 肖治术. 2019. 物种相对多度指数在红外相机数据分析中的应用及局限. 生物多样性, **27** (3): 6.
- 陈华豪. 1989. 有蹄类数量调查方法的讨论. 野生动物学报, **6**: 17–21.
- 陈奕欣, 肖治术, 李明, 王新文, 何臣相, 李海曙, 施顺金, 向左甫. 2016. 利用红外相机对高黎贡山中段西坡兽类和鸟类多样性初步调查. 兽类学报, **36** (3): 302–312.
- 赵海涛, 王程亮, 王晓卫, 李保国, 王开锋, 李庭春, 李俊峰, 高存劳. 2015. 陕西米仓山国家级自然保护区猕猴的分布及种群数量调查. 生态学报, **35** (17): 5632–5637.
- 钟凌, 贾康胜, 王晓卫, 雷颖虎, 曹崇文, 王程亮, 任轶, 付卫伟, 赵海涛, 李保国. 2018. 陕西省楼观台实验林场川金丝猴的种群数量及分布. 四川动物, **37** (2): 219–223.
- 施方勤. 2009. 白马雪山滇金丝猴种群数量分布调查研究. 内蒙古林业调查设计, **32** (5): 102–103.
- 袁朝晖, 孙建存, 宁智刚, 时鉴. 2003. 长青保护区金丝猴种群数量与分布调查. 陕西师范大学学报 (自然科学版), **S2**: 173–176.
- 徐会明, 和育超, 张利周, 黄志旁. 2015. 云南云龙天池自然保护区龙马山黑白仰鼻猴种群动态调查. 林业调查规划, **40** (3): 57–59.