

基于相机陷阱法的城市绿地哺乳动物种群密度估算方法

孔垂澜

摘要：城市绿地为城市生态系统中的野生动物提供了适宜的栖息地，在邻里生物多样性保护（BCON）中扮演着关键角色。相机陷阱法和随机相遇模型提供了非侵入性的城市绿地哺乳动物种群密度估算方法。本文介绍了随机相遇模型的背景、方法和优势。虽然在中国尚未得到广泛应用，但相机陷阱法和随机相遇模型为全面了解城市绿地中野生动物的分布和种群状况提供了有前景的框架，为城市生态系统和邻里生物多样性保护提供有力支持。未来的研究可考虑运用相机陷阱法和随机相遇模型监测城市绿地中的哺乳动物密度，但需谨慎选择研究对象，以确保满足随机相遇模型的基本假设。

关键词：哺乳动物，种群密度，相机陷阱法，随机相遇模型，城市生态系统

孔垂澜. 基于相机陷阱法的城市绿地哺乳动物种群密度估算方法. 生物多样性保护与绿色发展. 第1卷, 2024年1月, 总第55期. ISSN2749-9065

一、介绍

种群密度估计对野生动物的保护和管理至关重要。密度是评估种群状况、以及比较不同时间和空间的种群的理想指标^{[1][2]}。在城市生态学中，种群密度有助于更深入地了解动物种群在城市地区的分布情况，以及人为因素如何影响这种分布。目前提出了多种估算动物种群密度的方法，例如标记重捕法^[3]。然而，标记重捕法属于侵入性方法，可能对目标物种以及区域内的其他物种造成影响，并且需要消耗大量人力，成本较高。红外相机陷阱法提供了非入侵性城市绿地哺乳动物密度监测方案，且为夜行动物密度估计提供了解决方案。与其他方法相比，尽管初期成本可能更高，

但从长远来看，相机监测被认为更具成本效益^[4]。

目前有一系列模型被用于利用红外相机捕捉到的信息来估计动物密度，例如根据标记重捕法开发的空间标记-重捕模型。然而，该模型需要进行个体识别。考虑到许多物种不具备个体识别特征，该模型的广泛应用相对受限。

Marcus Rowcliffe 博士等人于2008年提出了随机相遇模型(Random Encounter Model, REM)，该模型提供了一种无需进行个体识别的种群密度估计方法。随机相遇模型基于二维气体模型中的随机碰撞理论，其相遇率由特定时间内粒子覆盖面积与二维平面总面积之比确定。传统的二



维模型假设物体周围存在一个圆形区域,当另一个物体进入该圆形区域时,相遇就会发生。然而,相机的拍摄范围通常是扇形,不同于完整的圆形,这意味着当相机移动时,覆盖面积的宽度不再以圆形直径衡量,而是以相机探测区域展现给动物的剖面宽度为准^[5]。

该模型结合了对原始捕获率丰度指数的偏差校正,并从物理学的数学模型中导出。如以下公式所示,REM会考虑动物的捕获率、行进速度、活动水平和相机视野的大小来估计动物密度。

$$D = \frac{y}{t} \frac{\pi}{vpr(2 + \theta)}$$

其中D是动物密度的估计值。y是动物与摄像机接触的次数;t是摄像机的总部署时间。y与t的比值被称为捕获率。v是动物活动时的行进速度,p是它们的活动水平(活动时间所占比例)。最后,r和θ分别是径向距离和角距离,定义了相机的有效检测区域^[5]。

REM的三个基本假设是,红外相机是随机放置的;研究区域是封闭的,不考虑迁入迁出对种群数量造成的影响;动物可以在研究区域内随机独立地移动,不受彼此和红外相机的影响^[6]。通过将REM的结果与涉及不同

物种和环境的研究中使用的其他监测方法的结果进行比较,许多研究已经证明了REM在估算哺乳动物密度应用中的可靠性^{[7][8][9]}。

二、方法

(一) 数据收集

在实践中,红外相机会被随机放置在距离地面约30至40厘米的最近的垂直结构上,如围栏、门柱或树。在此前的研究中,随机放置通常局限于相机放置位置的随机。研究者会通过系统性样点布设方式选择相机放置点位,却忽略了相机朝向的随机,这很有可能导致种群密度的错误估计。例如,当确定的相机放置点位位于路边的草地上,如果主观地将其朝向草地放置,可能会导致种群密度的高估;反之,则可能会导致低估^[10]。

当相机结束其工作周期(通常持续两周到一个月不等),管理人员会对相机捕获到的物种进行识别并使用图片处理软件对所有捕获到的照片进行标注。一些基于机器学习开发的模型可协助进行物种识别,如微软开发的MegaDetector^[11]。

(二) 校准

想要从相机捕获的照片中提取估算密度所需的动物行进速度和相机视野大小等参数,有两个必须进行



的过程：相机校准及现场校准。相机校准与现场校准均需使用校准杆（见图 1 中的红色杆）。

相机校准的目的是测量相机的焦距和传感器尺寸^[12]。这是通过在距离相机几个已知距离处拍摄校准杆的图像并测量已知长度的像素尺寸创建的。通常，工作人员会走到距离相机已知距离处，用手势表明当前距离，方便图片相机校准模型的建立。一般需要至少十张照片以建立相机校准模型。一旦对一个特定型号的相机完成过一次校准，再部署该型号相机时可以直接使用该相机校准模型而无需再次进行校准。

现场校准模型旨在将像素位置映射到真实世界位置^[12]。这是通过使用与每次部署时覆盖视场的摄像机相距已知距离的校准杆的图像创建的。像素位置和校准杆的已知距离用于拟合模型。它们的距离是使用相机校准模型计算的，该模型记录了相机的焦距和传感器尺寸，从而能够根据已知长度的像素尺寸计算杆子的距离。通常需要超过十张照片以建立现场校准模型。与相机校准模型不同，即使部署了相同型号的红外相机，在不同部署点位也须建立各自的现场校准模型。当相机发生了轻微抖动，改变了位置或角度，须重新建立现场校准模型。

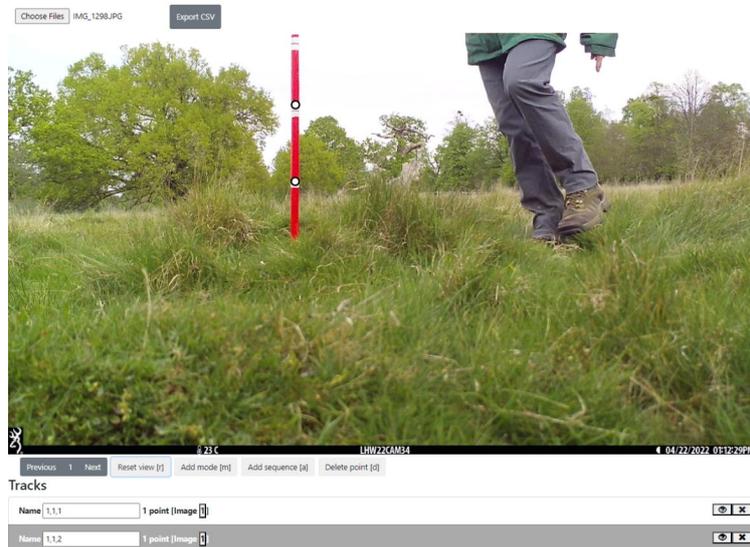


图 1：对校准杆进行标注（两个白点标注了距离地面 20 cm, 40 cm 位置）。（Kong, 2023）

在完成校准后便可使用现场校准模型根据图像中动物的位置计算动物相对于相机的位置。当动物在一系列照片中穿过相机的视野时，会指

定跟踪点来表示其在每帧中的位置。例如，图 2 展示了标定动物（刺猬）的跟踪点的过程。跟踪点被确定为刺猬中心点在地面自上而下的投影位



置。为了最大限度地减少个人空间感差异对跟踪点确定的潜在影响,通常由一个人独自完成该工作,以确保整个过程的一致性。通过聚合所有定位

点,生成一个数据集,该数据集包含动物从平面视图中数字化的像素位置。



图 2: 标定动物 (刺猬) 跟踪点。(Kong, 2023)

(三) 参数计算

动物与红外相机接触后,相机会拍摄一个序列的照片。拍摄间隔取决于相机型号和相应设置,通常设置为每隔一秒拍摄一张。动物和相机之间每个接触序列的第一张照片(称为第一次接触)的照片日期、时间和物种标签等信息被用来创建一个子集。随后,构建了一个新的数据框,包括每个红外相机的运行时长和与第一次接触的次数。使用该数据框计算捕获率,并使用非参数自举(Non-parametric bootstrapping)估计标准误差。

动物的活动水平是通过将 Circular Kernel Model 拟合到第一

次接触子集的时间获取的,并通过自举法(Bootstrapping)估计活动水平的标准误差。

在计算速度的平均值及其相关标准误差时,由于更快的速度被记录的可能性更高,使用谐波平均值(Harmonic Mean)来降低更快的速度,标准误差仍由自举法给出。

检测区域由两个参数定义,即径向距离和角距离。其中角距离是指动物与相机连线与法线(相机视野的中心线)之间的夹角。当动物出现在相机法线左半部分时,角距离为负值;当动物出现在相机法线右半部分时,角距离为正值。由于相机视野对称,通常对角距离取绝对值。径向距离和



角距离是通过使用风险率检测函数 (Hazard Rate Detection Functions) 拟合第一次接触的子集来计算的。模型选择采用赤池信息准则 (Akaike Information Criterion, AIC)。标准误差采用 Population Prediction Interval Approach 计算。

至此已获得所有所需参数值, 可以通过将其带入随机相遇模型的公式估算物种密度。密度的标准误差是使用德尔塔法 (Delta Method) 计算的, 以结合所有随机相遇模型变量的标准误差。

三、讨论——城市绿地中的应用

随机相遇模型被广泛应用于城市绿地种群密度的评估, 尤其是刺猬种群密度的评估。如 Jessica Schaus 等人使用了随机相遇模型评估了英国五个城市地点的刺猬密度^[13]; de Oliveira 在伦敦摄政公园内开展的刺猬种群评估^[14]; Katie Wells 在汉普特斯西斯公园开展的刺猬种群调查^[15]。针对城市绿地中刺猬种群的研究有两个优势: 一是刺猬作为生境指示种, 对其种群数量的研究可以揭示栖息地的质量; 二是相对而言, 城市绿地的刺猬种群更易满足随机相遇模型的第二个假设, 即封闭的研究区域。在 Jessica Schaus 等人的研究

中, 他们假设种群是封闭的, 因为研究区域被限制刺猬活动的障碍物包围 (例如主要道路)。由于刺猬厌恶道路表面的合成材料^[16]且活动能力较弱, 这种假设被认为是合理的。然而, 当以狐狸、獾等动物为研究对象时, 需谨慎考虑城市绿地边缘是否能限制目标物种的迁入迁出。

此外, 红外相机陷阱法的应用不止于估算种群密度。一系列研究根据捕获率分析植被覆盖类型、捕食者分布等因素对动物种群分布的影响。例如 Katie Wells 分析了汉普特斯西斯公园垃圾桶分布对刺猬种群分布的影响; 另有研究分析了刺猬种群分布如何受游客密度、车辆密度影响^[10]。这些研究可以帮助人类更好地了解和保护受人类活动影响和控制的都市生态系统。

在中国, 红外相机陷阱法和随机相遇模型在城市绿地动物种群监测的应用较少。随着城市化的不断深入, 城市绿地作为城市生态系统中适宜的野生动物栖息地, 在邻里生物多样性保护中扮演着重要角色。了解城市生态对于有效保护这些主要由人类活动塑造和控制的景观至关重要。相机陷阱法和随机相遇模型无疑为此提供了一个有效的渠道。



四、结论

红外相机陷阱法的应用为非侵入性的动物监测提供了一种成本效益更高的选择。随机相遇模型无需进行个体识别,考虑了动物的捕获率、行进速度、活动水平和相机视野的大小,提供了一种有效的途径,帮助评估动物种群的密度。尽管在中国的应用尚处于初步阶段,但相机陷阱法和随机相遇模型提供了一个具有开阔前景的框架,以更全面地了解城市绿地中野生动物的分布和种群状况,从而为城市生态系统的保护和管理提供支持,助力邻里生物多样性保护。

参考文献

- [1] Scott, D.M., Baker, R., Charman, N., Karlsson, H., Yarnell, R.W., Mill, A.C., Smith, G.C. & Tolhurst, B.A. (2018). A citizen science based survey method for estimating the density of urban carnivores. *PloS One* 13, e0197445.
- [2] Morin, D. J., Boulanger, J., Bischof, R., Lee, D. C., Ngoprasert, D., Fuller, A. K., ... & Karanth, U. (2022). Comparison of methods for estimating density and population trends for low-density Asian bears. *Global Ecology and Conservation*, 35, e02058.
- [3] Thompson, William L., Gary C. White, and Charles Gowan. *Monitoring vertebrate populations*. Elsevier, 1998.
- [4] Wearn, O. & Glover-Kapfer, P. (2017). *Camera-trapping for conservation: a guide to best-practices*. WWF Conserv. Technol. Ser., Woking, UK: WWF-UK 1.
- [5] Rowcliffe, J.M., Field, J., Turvey, S.T. & Carbone, C. (2008). Estimating animal density using camera traps without the need for individual recognition. *J. Appl. Ecol.* 45, 1228 - 1236.
- [6] Rowcliffe, J.M., Kays, R., Carbone, C., and Jansen, P.A. (2013). Clarifying assumptions behind the estimation of animal density from camera trap rates. *Journal of Wildlife Management* 77, 876.
- [7] Anile, S., Ragni, B., Randi, E., Mattucci, F. & Rovero, F. (2014). Wildcat population density on the Etna volcano, Italy: a comparison of density estimation methods. *J. Zool.* 293, 252 - 261.
- [8] Cusack, J.J., Swanson, A., Coulson, T., Packer, C., Carbone, C., Dickman, A.J., Kosmala, M., Lintott, C. & Rowcliffe, J.M. (2015). Applying a random encounter model to estimate lion density from camera traps in



- Serengeti National Park, Tanzania. *J. Wildl. Manag.* 79, 1014 - 1021.
- [9] Zero, V.H., Sundaresan, S.R., O'Brien, T.G. & Kinnaird, M.F. (2013). Monitoring an Endangered savannah ungulate, Grevy's zebra *Equus grevyi*: choosing a method for estimating population densities. *Oryx* 47, 410 - 419.
- [10] Kong, C. (2023). The impact of human activity on hedgehog density in an urban greenspace [Master's thesis]. Imperial College.
- [11] Microsoft, 2020. AI for Earth camera trap image processing API. <https://github.com/microsoft/CameraTraps/blob/master/megadetector.md> (引用日期: 2024/01/03)
- [12] Wearn, O. R., Bell, T. E., Bolitho, A., Durrant, J., Haysom, J. K., Nijhawan, S., ... & Rowcliffe, J. M. (2022). Estimating animal density for a community of species using information obtained only from camera - traps. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(10), 2248-2261.
- [13] Schaus, J., Uzal, A., Gentle, L. K., Baker, P. J., Bearman - Brown, L., Bullion, S., ... & Yarnell, R. W. (2020). Application of the Random Encounter Model in citizen science projects to monitor animal densities. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(4), 514-528.
- [14] de Oliveira, R. (2019). Annual changes in the density, travel speed, and activity levels of European hedgehogs *Erinaceus europaeus* in The Regent's Park, London [Master's thesis]. University of London.
- [15] Wells, K. (2020). An investigation into the density and behaviour of two urban mammals within an urban park in London [Master's thesis]. Imperial College.
- [16] Rondinini, C., & Doncaster, C. P. (2002). Roads as barriers to movement for hedgehogs. *Functional Ecology*, 16(4), 504-509.

