

探讨基于红外相机技术对大型猫科动物及其猎物的种群评估方法

李治霖^{1,2#} 康霭黎^{2#} 郎建民³ 薛延刚³ 任毅² 朱志文²
马建章¹ 刘培琦^{2*} 姜广顺^{1*}

1 (东北林业大学野生动物资源学院, 国家林业局猫科动物研究中心, 哈尔滨 150040)

2 (国际野生生物保护学会(WCS)中国项目, 北京 100080)

3 (吉林珲春东北虎国家级自然保护区管理局, 吉林珲春 133300)

摘要: 红外相机技术的发展促进了对东北虎(*Panthera tigris altaica*)、东北豹(*Panthera pardus orientalis*)及其猎物种群的研究。本研究以珲春保护区春化和马滴达两个区域的监测结果为例, 介绍利用该技术对我国长白山区东北虎、东北豹及其猎物的种群评估方法, 包括监测位点的选择、相机的架设方式及参数设置、数据筛选、东北虎和东北豹体侧花纹个体识别方法、物种相对丰富度的计算以及捕食者与猎物丰富度关系模型的构建。最后就东北虎、东北豹体侧花纹个体识别技术的适用性、红外相机监测与传统调查方法的差异, 相机监测的误差进行了讨论。研究表明, 利用红外相机技术进行密度预测以及东北虎、东北豹个体自动识别技术还需继续完善。1对/25 km²的相机架设密度基本上满足对于珲春保护区春化至马滴达区域虎豹的监测强度要求, 但对于有蹄类则需要另外的监测方案。

关键词: 广义可加模型, 个体识别, 相对丰富度指数, 误差分析, 种群评估

On the assessment of big cats and their prey populations based on camera trap data

Zhilin Li^{1,2#}, Aili Kang^{2#}, Jianmin Lang³, Yangang Xue³, Yi Ren², Zhiwen Zhu², Jianzhang Ma¹, Peiqi Liu^{2*}, Guangshun Jiang^{1*}

1 College of Wildlife Resources, Northeast Forestry University; The Feline Research Center of State Forestry Administration, Harbin 150040

2 Wildlife Conservation Society (WCS), China Program, Beijing 100080

3 Jilin Hunchun Amur Tiger National Nature Reserve Administration, Hunchun, Jilin 133300

Abstract: The development of camera traps has improved our ability to study Amur tigers (*Panthera tigris altaica*), Amur leopards (*Panthera pardus orientalis*) and their prey populations. This research introduces camera trap monitoring methods of Amur tigers, Amur leopards and their prey populations in Chunhua and Madida areas of the Hunchun Nature Reserve, Changbai Mountains, China. A selection of monitoring positions, methods of erecting, parameter settings, and data filtering techniques are presented. Additionally, unique identifiers of Amur tigers and Amur leopards based on body patterns, calculations of relative abundance indexes (RAI), and the establishment of RAI models between the predators and prey are presented. We discuss the applicability of unique identifiers with ipsilateral patterns, the differences between camera trap monitoring and traditional survey methods, and the error of camera trap monitoring. We conclude that predicting densities of Amur tigers and Amur leopards with camera traps and automatic-individual-identifiers still needs improvement. Camera trap densities of one pair per 25 km² can meet the needs for Amur tigers and leopards within Chunhua and Madida of the Hunchun Nature Reserve, but a separate monitoring project is

收稿日期: 2014-04-14; 接受日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(31272336)、国家基金委专项基金(L1322010)和 WCS 中国项目

共同第一作者 Equally contributed to this paper

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: pliu@wcs.org; jgshun@126.com

needed for ungulates prey.

Key words: generalized additive models, individual identify, relative abundance index, error analysis, population evaluation

长期进行物种丰富度监测, 掌握物种多样性的变化趋势对自然保护区而言是十分重要的工作。然而对于数量稀少、活动隐蔽的野生动物, 以往只能通过痕迹来间接评估其丰富度。目前我国野生动物丰富度调查主要使用传统的粪堆法(马建章等, 1989)、样线法(the Formozov-Malyshev-Pereleshin, FMP)(Stephens *et al.*, 2006b)、样带法(Harris *et al.*, 1992)、大样方调查法(张常智和张明海, 2011)、非损伤性法(Non-invasive capture-mark-recapture, CMR)(张于光等, 2003)以及红外相机监测法。样线法利用雪地足迹链数量、动物日活动距离等指标预测动物密度, 但季节、生境的差异会对动物的日活动距离造成影响继而降低该方法的准确性。样带法通过样带内足迹、粪便、卧迹等动物痕迹并结合样带面积求出动物密度。因不同调查者对动物痕迹的数量、新鲜程度等用来判定动物个体的指标估计有所不同, 使得该方法主观性较强, 得到的调查结果误差较大。大样方法基于一个密闭的多边形, 通过 24 h 内进出多边形的动物实体数量来统计样方内的动物密度。该方法的结果较样线法与样带法更加保守。CMR法准确性较高, 但DNA的降解以及较高的花费是制约其发展的主要因素(刘辉等, 2013)。红外相机技术的发展促进了对野生动物相对丰富度、活动节律、行为生态等方面的研究(Rovero & Marshall, 2009; Marcus *et al.*, 2012; 刘芳等, 2012; 章书声等, 2012)。该技术较传统监测方法的优点是具有非损伤性、可日夜连续监测。此外结合标志重捕法等生态模型, 红外相机监测还可以从多角度对种群密度进行评估(Gopaldaswamy *et al.*, 2012)。

红外相机技术的发展促进了捕食者-猎物关系的研究, 目前已经较为系统地应用于荒漠猫(*Felis bieti*)、孟加拉虎(*Panthera tigris tigris*)、美洲虎(*Panthera onca*)、山猫(*Lynx rufus*)等猫科动物的分布调查(Karanth, 1995; Wallace *et al.*, 2003; Heilbrun *et al.*, 2006; Yin *et al.*, 2007)。但在猫科动物相机监测中仍然存在一系列的问题: (1)最适监测密度与监测位置的确定。因为多数监测物种活动隐蔽, 相机监测仍属于抽样调查而不是整体计数(Foster &

Harmsen, 2012)。Dillon等(2007)认为相机布设的密度与位置应确保相机获得一个最佳的捕捉概率, 并且每个目标物种家域中至少应保证有2个监测点。但是实际上监测密度多为在实验设计与实际约束上的一个折中(Foster & Harmsen, 2012)。(2)如何快速对猫科动物进行个体识别。在影像数据样本量较少时, 简单的目视可以进行个体识别, 但是随着影像数据的增加, 如何快速准确的通过体侧花纹对猫科动物进行个体识别是研究者们面临的一个问题。(3)最佳相机监测方式的探索(包括相机架设方式与参数设置)。不同的猫科动物因为形态大小、生境等存在差异, 所以红外相机的监测参数也各有不同。因此针对不同区域不同物种找到一个最佳的相机监测方式, 对于提高监测质量是至关重要的。东北虎、东北豹作为我国濒危珍稀的猫科动物, 因其数量稀少、活动隐蔽, 采用传统的调查方法并不能得到较为理想的监测结果(Karanth, 1988; Karanth & Nichols, 1998; Riordan, 1998)。本文以珲春自然保护区春化与马滴达区域内东北虎、东北豹及其猎物的红外相机监测为例, 拟探讨基于红外相机技术的大型猫科动物及其猎物的种群评估方法。

1 研究方法

1.1 研究地概况

吉林珲春东北虎国家级自然保护区位于吉林省延边朝鲜族自治州的东部(42°24'40"–43°28'00" N, 130°17'18"–131°14'44" E), 总面积108,700 ha。区内动植物种类极其丰富, 计有野生植物119科314属537种, 国家I级重点保护野生动物9种, 国家II级重点保护野生动物33种。保护区自北向南一共设有青龙台、春化、马滴达、杨泡、板石和敬信6个保护站。春化和马滴达区域位于保护区中部, 东与俄罗斯豹地国家公园接壤, 是珲春保护区东北虎、东北豹密度相对较高的区域。

1.2 相机的架设

1.2.1 监测位点的预设与选择

首先, 使用Arc GIS 9.0对春化和马滴达地区地形图按5 km×5 km进行网格划分(图1), 在每个网格

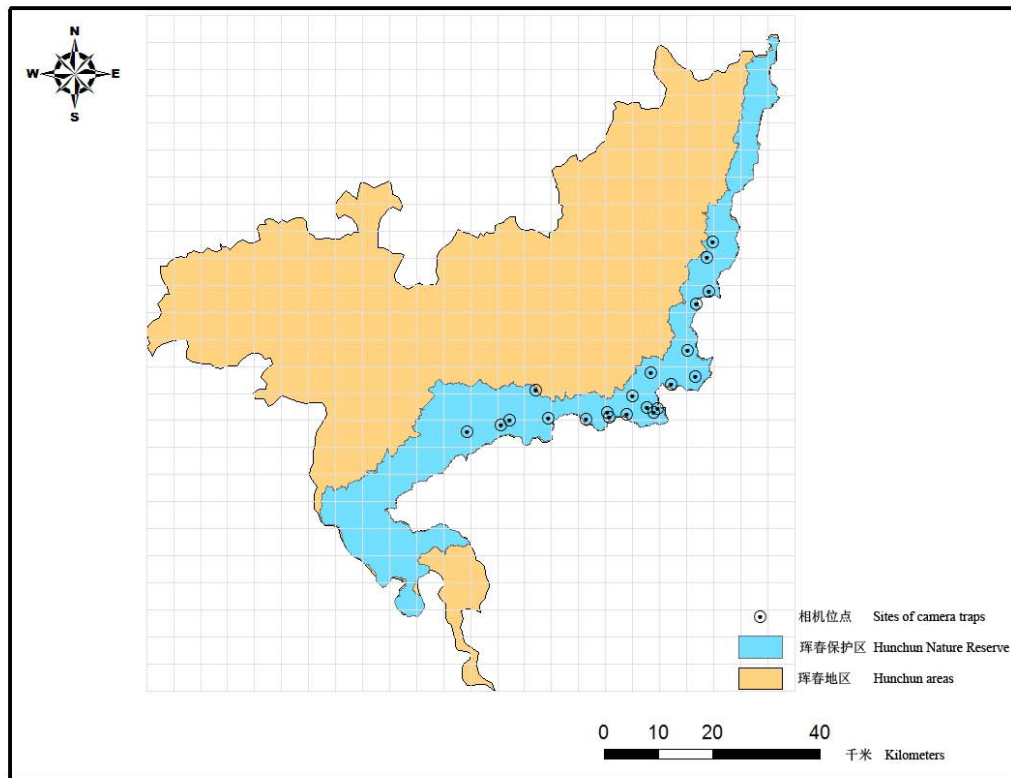


图1 吉林珲春东北虎国家级自然保护区春化至马滴达部分地区相机监测位置图

Fig. 1 The camera trap sites in Chunhua and Madida areas of the Hunchun Amur Tiger Nature Reserve in Jilin Province

中选择适宜东北虎、东北豹活动的区域进行监测点预设, 这些区域包括虎比较偏爱的河谷、废弃运材道以及豹比较偏爱的山岗、石砬子等处的兽道。其次, 按照预设点坐标进行实地评估, 注意虎豹的足迹、排泄物、挂爪、刨痕等信息, 根据野外实际情况对预设点进行微调并确定最终监测点坐标(图1)。本研究在春化至马滴达区域, 按照1对相机/25 km²的密度架设红外相机21对, 覆盖监测面积525 km²。

1.2.2 监测时间的选择

在实际监测中发现, 珲春保护区冬季因温度较低, 部分相机不能正常启动。在夏季因为野草生长茂盛会导致很多误拍, 致使内存不足而无法完成整个夏季监测期的监测工作, 而且夏季林中湿度较大容易使相机受潮损坏。因此, 本次调查选择在春秋两季进行, 其中春季的监测时间为2013年3月16日至6月15日, 秋季的监测时间为2013年9月23日至12月7日(以最早架设相机时间至最晚回收相机时间计算)。春秋两季的监测点位置无变化。春季相机监测布设时间在15天内完成, 数据回收在7天之内完成。

秋季相机监测布设时间在7天之内完成, 数据回收在7天之内完成。

1.2.3 相机的架设方式与参数设置

为清晰地拍摄东北虎、东北豹左右体侧花纹, 每个监测点布设两台相机, 垂直于兽道相对拍摄。相机距离兽道中线约3.5 m, 设置高度约0.5 m。每个监测点有一台相机为拍照模式, 每次触发连拍3张照片; 另一台相机使用录像模式, 每次触发拍摄视频10 s, 两次触发的时间间隔为0 s。为防止产生过多误拍, 相机的PIR感应器灵敏度设置为低。

1.3 相机数据的筛选与统计

在完成监测周期回收数据后, 对每一台相机进行图片或视频筛选, 删除非动物触发造成误拍的影像。每台相机的监测周期为相机的架设时间至相机最后一次触发拍摄图片或视频的时间。若相机的电池或存储卡不能支持相机工作至监测人员回收数据时, 则最后一次触发图片的时间记为该相机监测的终止时间。“独立有效照片”时间间隔为含同种个体的相邻有效照片间隔时间。本研究将此时间间隔

定为1 min。一个监测点的两台相机数据统计完毕后,再按照时间序列把该监测点的两台相机信息进行比对与修正,得出该监测点在监测期间的综合监测信息。监测点在同一时刻若对应相同的物种及相同的事件,则表明两台相机有着相同的记录,任何一台相机的记录都可作为该监测点的此次“事件”;若两台相机对同一物种有不同的“事件”记录,则需要查阅监测影像综合判断该监测点的此次“事件”。监测点的监测周期按照两台相机中的最长工作时间计算。

1.4 东北虎和东北豹的体侧花纹个体识别技术

对于东北虎、东北豹等具有体侧花纹的动物个体,可以利用动物个体体侧花纹来进行个体识别,从而精确得出监测到的虎豹个体数量(Hiby *et al.*, 2009)。东北虎的条纹与东北豹的斑点是其体表的主要特征。除此之外,东北虎的条纹还具有不变性,东北虎从出生到死亡其条纹特征不随大小、体型的改变而改变(顾佳音等, 2013)。虎豹的体侧中部、后肢外侧等部位条纹与斑点具有很大的个体差异性,十分适合进行个体识别(Stephens *et al.*, 2006a)。

本研究使用动物体侧花纹识别软件Extract Compare V1.20(Thrigby Hall Zoo)以及目视对比识别软件Fast Stone Image Viewer 4.9来对虎豹图片/视频进行个体识别。图片数据可以直接输入Extract Compare软件,而视频数据则提取清晰的帧图片输入软件。

Extract Compare软件可以对东北虎的体侧与后肢外侧、东北豹的体侧皮肤建立三维表面模型(附图1),该模型通过拟合动物不同的运动姿态得到动物体侧花纹的平整图形(附图2),随后软件会根据提取的条纹或斑块的相对位置提取图形信息,并建立基于Access的数据库。软件通过对图片信息的相似度进行对比来得到数据库中两两体侧花纹的相似系数并按照降序进行排列。最后按照软件给出的相似度顺序进行人工目视对比验证,对相同的虎豹个体进行配对,从而分析数据库中照片的虎豹个体数量。该技术具有快捷、准确性高、操作简单等特点,适合大样本量的东北虎、东北豹影像数据库的个体识别与分析。该软件的试用版目前可以免费下载(www.conservationresearch.co.uk)。

对于体侧花纹清晰度不佳的图片或视频,使用目视识别软件Fast stone Image Viewer 4.9来对虎豹

其他位置的清晰花纹进行对比判别。在对东北虎、东北豹进行个体确定后,通过图片或视频观察其是否存在睾丸来对东北虎进行性别判定(附图1)。

1.5 物种相对丰富度指数的计算

监测物种被相机拍摄的频率可以表示该物种的丰富度(Marcus *et al.*, 2012)。目前通常使用相对丰富度指数(RAI)表示监测物种的丰富度,即每100个捕获日所获取某一物种在所有相机位点($i = 1, 2, \dots$)的独立有效照片数。公式表示为 $RAI = \sum_{i=1} d_i \times 100 / \sum_{i=1} t n_i$ (其中 d_i 表示为在 i 相机位点捕获的物种次数, $t n_i$ 表示为在 i 相机位点正常工作的捕获日)(Carbone *et al.*, 2001)。

1.6 构建捕食者-猎物丰富度关系模型

本研究使用广义可加模型(generalized additive models)来建立捕食者与猎物之间的丰富度关系。作为广义线性模型(generalized liner models)的延伸,广义可加模型不仅可以承载更多分布类型的数据,更可以反映自变量与因变量之间高度非线性、非单调的作用关系(Guisan *et al.*, 2002)。由于本次调查只在4个点拍到了东北豹,样本量较少,因此只构建东北虎与猎物的丰富度关系模型。按照出现-不出现的情况,把监测期间拍到东北虎的监测点记为“1”,未拍到东北虎的监测点记为“0”。使用广义可加模型对东北虎是否出现与野猪(*Sus scrofa*)、梅花鹿(*Cervus nippon*)、西伯利亚豹(*Capreolus pygargus*)的相对丰富度指数建立回归。广义可加模型在R语言的mgcv包中实现。

2 结果

2.1 东北虎和东北豹的个体数量估计

在春秋两季的监测周期内,共拍摄到东北虎“事件”数20次,东北豹“事件”数4次,东北虎的RAI要高于东北豹(表1)。经个体识别,该区域共拍摄到东北虎5只、东北豹2只(附图3)。综合每个个体的全部影像资料,5只东北虎中有2只雄性3只雌性,2只东北豹全部为雌性。

2.2 猎物种群的相对丰富度

监测区域秋季各物种的RAI要高于春季,但只有梅花鹿在春秋两季达到显著性差异($P=0.014$) (表1)。春季RAI最高的为西伯利亚豹($RAI=2.3$),其次为野猪、梅花鹿;秋季RAI和春秋合计RAI最高的为梅花鹿($RAI_{秋季}=5.544$; $RAI_{春秋合计}=3.311$),其次为野

猪、西伯利亚豹。两季猎物的RAI在春秋季节间达到了显著性差异水平($P=0.016$)。

2.3 捕食者-猎物丰富度关系

广义可加模型结果显示(图2), 梅花鹿的RAI与东北虎的出现概率存在显著正相关($P=0.039$), 但西伯利亚豹与野猪对于东北虎的出现概率无显著性影响($P_{\text{西伯利亚豹}}=0.23, P_{\text{野猪}}=0.51$)。

3 讨论

3.1 东北虎、东北豹丰富度与个体识别技术适用性

Carbone等(2001)研究表明, 虎的RAI与实际密度之间存在显著的相关性。雄性东北虎的家域大小为 $1,385 \pm 539 \text{ km}^2$, 日活动距离为 9.6 km/天 ; 雌性东北虎的家域大小为 $390 \pm 136 \text{ km}^2$, 日活动距离为 7 km/天 (Yudakov & Nikolaev, 1987; Goodrich *et al.*, 2010), 本次按照1对/25 km^2 的相机布设密度可以保证对东北虎的充分探测。我们使用体侧花纹个体识别法得出东北虎与东北豹的绝对数量之比为5:2, 如果分别计算其相对丰富度, 则二者之比为5:1, 这两种方法所得的虎、豹丰富度的结果较为接近。本研究为了增大对东北虎的探测几率, 监测点多选取在东北虎偏爱的运材道上, 而对于东北豹偏爱的山岗生境则存在探测不足的情况, 这可能是导致本次监测到东北豹次数与个体数较少的原因之一。

在野外监测中, 目前除使用体侧花纹对东北虎和东北豹进行个体识别外, 其他的个体识别方法还有从粪便、毛发中提取DNA(Mills *et al.*, 2000)、提取脚印形状(Riordan, 1998)以及使用专门训练的犬通过粪便的气味进行个体识别(Kerley & Salkina, 2007)。DNA分析法可以得到准确的个体、性别、亲缘关系等信息, 但是花费较高, 且在野外采集粪

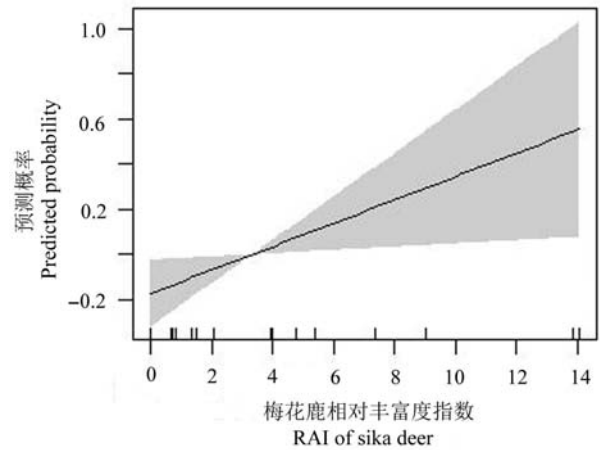


图2 梅花鹿相对丰富度指数对东北虎出现概率广义可加模型(GAM)回归示意图

Fig. 2 Generalized additive models response diagram of probability of Amur tigers presence to $RAI_{\text{Sika Deer}}$

便等样本也较为困难。通过脚印形状进行个体识别花费较少且脚印采集较为简单(顾佳音等, 2013), 但只能在冬季进行, 不利于全年的持续监测。通过犬利用粪便气味进行个体识别则需要对犬进行专门的训练, 且在我国东北地区野外遇到虎豹粪便的概率较低。而体侧花纹个体识别技术要求监测样地拥有较稳定的野生种群。该方法目前只在长白山区的珲春地区较为适用, 而在完达山区等东北虎密度较低的地区则并不适用。因此, 在进行虎豹个体识别时, 应视具体的生境、时间而选择适当的个体识别方法。

3.2 红外相机监测与传统调查结果比较

Rovero等(2009)发现物种的RAI与密度之间存在很强的相关性, 希望在RAI与实际密度之间建立

表1 东北虎及东北豹在春秋季节的相对丰富度指数及丰富度差异性检验结果

Table 1 The relative abundance indices of Amur tigers, Amur leopards and their prey between spring and autumn

监测项目 Monitoring items	春季 Spring	秋季 Autumn	春秋合计 Spring and autumn	Mann-Whitney U ($n=39$)	
				Z	P
捕食者 Predator	0.613	1.365	0.969	-0.745	0.233
东北虎 Amur tiger	0.536	1.108	0.807	-0.226	0.37
东北豹 Amur leopard	0.076	0.255	0.161	-1.165	0.109
猎物 Prey	5.228	13.136	9.288	-2.117	0.016*
野猪 Wild boar	2.147	4.009	3.028	-0.401	0.363
西伯利亚豹 Roe deer	2.300	3.582	2.907	-0.879	0.187
梅花鹿 Sika deer	1.303	5.544	3.311	-2.173	0.014*

联系,并尝试利用RAI来对不能进行个体识别的物种进行密度评估。李冰(2010)在2006–2008年对珙春自然保护区的FMP样线法调查显示,梅花鹿、马鹿(*Cervus elaphus*)、西伯利亚狍、野猪的平均密度分别为0.044、0.054、0.427、0.05只/km²。陈九屹等(2011)在2009–2010年使用FMP样线法对珙春保护区的调查显示,梅花鹿、马鹿、西伯利亚狍、野猪的平均密度分别为0.07、0.11、0.76、0.01只/km²。但是本次调查得到的RAI值与样线调查的物种密度之间却未能进行很好的回归($R^2_{\text{李冰-RAI}}=0.0554$; $R^2_{\text{陈九屹-RAI}}=0.0277$)。RAI值与密度值都表明在珙春地区有较高的西伯利亚狍分布,但是野猪和梅花鹿的RAI却与密度调查结果相反(表1)。究其原因,FMP样线调查方法本身存在较大误差(刘辉等,2013),且以前的样线调查是在冬季针对整个珙春保护区进行,而本调查是在春秋季节针对春化至马滴达区域进行。Soh等(2014)对珙春地区有蹄类调查显示,珙春至马滴达区域较保护区其他区域有着更高的梅花鹿密度,本次红外相机调查支持这一结论。保护区内部有蹄类的异质分布以及调查季节的差异可能是造成相机监测与已有的样线调查结果差异的原因。

3.3 误差分析

误差问题是影响监测结果的因素之一。RAI所使用的依据是把记录某物种影像的频繁程度作为该物种的丰富度指标(Marcus *et al.*, 2012),其误差的产生也是多环节的。首先,监测点的两台相机能否拍摄到经过该监测点的所有动物。红外相机的拍摄能力与架设的时间、地点、位置有关,针对不同的物种其拍摄能力也不同。红外相机传感器在白天可能不如温度较低的夜晚灵敏(Lynam *et al.*, 2013)。其次,相机自身的问题也可能造成漏拍的现象。监测相机在每次触发连拍照片之间有2–3 s的间隔,并且即使将两次触发时间间隔调为0 s,在实际工作时相邻触发的间隔时间却是1–2 s,这些时间间隔可能会造成漏拍的发生,这对啮齿类、鼬科等小型动物可能会产生较大影响,而对于大型猫科动物及有蹄类的影响应进一步评估。第三,独立有效照片时间间隔的选择。在本次研究中将该时间间隔设置为1 min,这是对于多时间段拍摄到相同个体和在1 min内漏拍同物种其他个体的折中(Bowkett *et al.*, 2008)。目前相关研究中独立有效照片时间间隔有1 min(刘芳等,2012)和1 h(Rovero & Marshall, 2009),

但本次监测数据分别按照独立有效照片时间间隔为1 min与1 h进行分类后,各物种在两种分类的事件数之间并不存在显著性差异($P_{\text{东北虎}}=1$; $P_{\text{东北豹}}=1$; $P_{\text{野猪}}=1$; $P_{\text{西伯利亚狍}}=0.815$; $P_{\text{梅花鹿}}=0.997$)。本次数据同物种相邻事件的拍摄时间多为1 h以上,这可能是造成各物种在两种分类的事件数之间不存在显著性差异的原因之一。独立有效照片时间间隔受调查地域与监测物种影响较大,珙春地区各监测物种的最适独立有效照片时间间隔应继续关注。第四,对于多物种使用同样的相机监测方式本身就会对丰富度造成一定的偏差,因为适合一个物种的监测方式不一定适合另一个物种(Foster & Harmsen, 2012)。此次监测布设的相机密度为1对/25 km²,而梅花鹿、西伯利亚狍、野猪的平均日活动距离分别为2.78 km、0.79 km与3 km(Stephens *et al.*, 2006a),这样的相机监测密度对活动范围相对较小的这些有蹄类存在一定程度的取样不足。

在进行体侧花纹个体识别方法上,Extract Compare V1.20仍然存在一定的不足。首先,该方案还不能完全摆脱人眼目视识别,即该软件只能给研究者提供动物体侧花纹对比的相似系数,方便研究者在大型数据库中的对比筛选,但最终判定结果仍然需要人为的目视检测,这就难免存在人为主观因素的干扰。其次,在建立动物三维表面模型时,仍需要研究者根据动物的姿态创建一些参考点(附图1),这同样会增加人为随机性对判定结果的干扰。对于体侧花纹相似度较高的虎豹个体,该方法中人为随机性的缺陷会较为突出。除此之外,对虎豹在进行个体识别的基础上使用标记重捕模型进行密度评估可以有效减少监测误差,而对于不能识别个体的物种可以利用样方调查结果对RAI进行回归拟合,找出各监测物种的RAI与实际密度之间的联系(Rowcliffe *et al.*, 2008)。

基于以上几点,我们认为在今后开展大型猫科动物及猎物种群评估时,应该:(1)相机监测技术与样方调查法进一步结合;(2)继续完善体侧花纹个体识别技术图形数据的自动提取与相似度阈值判别;(3)使用质量可靠的红外相机、生态统计模型;(4)选择适宜的相机架设高度和独立有效照片时间间隔。此外,1对/25 km²的监测密度基本上满足对于珙春保护区东北虎、豹的探测需求,但兼顾虎豹及猎物的最适监测密度在今后的研究中还要持续关注。

致谢: 在数据处理和分析过程中, 俄罗斯豹地国家公园(Land of Leopard National Park)的豹野外监测专家蒂娜、俄罗斯国家科学院远东分部土壤生物研究所的阿里克谢、中国科学院动物研究所的干晓静博士以及琿春保护区的肖佳女士给予了大量的帮助, 在此一并表示感谢。

参考文献

- Bowkett AE, Rovero F, Marshall AR (2008) The use of camera-trap data to model habitat use by antelope species in the Udzungwa Mountain forests, Tanzania. *African Journal of Ecology*, **46**, 479–487.
- 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 DM, Martyr D, Martyr C, Nath L, O'Brien T, Seidensticker J, Smith DJL, Sunquist M, Tilson R, Wan Shahrudin WN (2001) The use of photographic rates to estimate densities of tigers and other cryptic mammals. *Animal Conservation*, **4**, 75–79.
- Chen JY (陈九屹), Nasen D (那顺得力格尔), Sun QH (孙全辉), Zhang LJ (张迺嘉), Tang JR (唐继荣), Lang JM (郎建民), Liu T (刘通), Liu KP (刘昆鹏), Xiao WH (肖文宏), Bao WD (鲍伟东) (2011) Amur tiger and prey in Jilin Hunchun National Nature Reserve, China. *Chinese Journal of Zoology* (动物学杂志), **46**(2), 46–52. (in Chinese with English abstract)
- Dillon A, Kelly MJ (2007) Ocelot *Leopardus pardalis* in Belize: the impact of trap spacing and distance moved on density estimates. *Oryx*, **41**, 469–477.
- Foster RJ, Harmsen BJ (2012) A critique of density estimation from camera-trap data. *Journal of Wildlife Management*, **76**, 224–236.
- Goodrich JM, Miquelle DG, Smirnov EN, Kerley LL, Quigley HB, Hornocker MG (2010) Spatial structure of Amur (Siberian) tigers (*Panthera tigris altaica*) on Sikhote-Alin Biosphere Zapovednik, Russia. *Journal of Mammalogy*, **91**, 737–748.
- Gopalaswamy AM, Royle JA, Hines JE, Singh P, Jathanna D, Kumar NS, Karanth KU (2012) Program SPACECAP: software for estimating animal density using spatially explicit capture-recapture models. *Methods in Ecology and Evolution*, **3**, 1067–1072.
- Gu JY (顾佳音), Liu H (刘辉), Jiang GS (姜广顺) (2013) A review of potential techniques for indentifying individual Amur tigers (*Panthera tigris altaica*). *Chinese Journal of Wildlife* (野生动物学报), **34**, 229–237. (in Chinese with English abstract)
- Guisan A, Edwards Jr TC, Hastie T (2002) Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, **157**, 89–100.
- Harris RB, Liu YS (刘永生), Cai GQ (蔡桂全), O'Gara BW (1992) Line transects for estimating density of musk deer pellet groups. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **12**, 302–305. (in Chinese with English abstract)
- Heilbrun RD, Silvy NJ, Peterson MJ, Tewes ME (2006) Estimating bobcat abundance using automatically triggered cameras. *Wildlife Society Bulletin*, **34**, 69–73.
- Hiby L, Lovell P, Patil N, Kumar NS, Gopalaswamy AM, Karanth KU (2009) A tiger cannot change its stripes: using a three-dimensional model to match images of living tigers and tiger skins. *Biology Letters*, **5**, 383–386.
- Karanth KU (1988) Analysis of predator-prey balance in Bandipur Tiger Reserve with reference to census reports. *Journal of the Bombay Natural History Society*, **85**, 1–8.
- Karanth KU (1995) Estimating tiger (*Panthera tigris*) populations from camera trap data using capture-recapture models. *Biological Conservation*, **71**, 333–338.
- Karanth KU, Nichols JD (1998) Estimation of tiger densities in India using photographic captures and recaptures. *Ecology*, **79**, 2852–2862.
- Kerley LL, Salkina GP (2007) Using scent-matching dogs to identify individual Amur tigers from scats. *Journal of Wildlife Management*, **71**, 1349–1356.
- Li B (李冰) (2010) *Status of Amur Tiger and Prey Population in Hunchun Nature Reserve, China and Conservation Research* (琿春自然保护区东北虎及猎物种群现状及保护研究). PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (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)
- Liu H (刘辉), Jiang GS (姜广顺), Li H (李惠) (2015) A comparative study on four survey methods used in ungulate population size in winter in north China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), doi: 10.5846/stxb201308172102. (in Chinese with English abstract)
- Lynam AJ, Jenks KE, Tantipisanuh N, Chutipong W, Ngoprasert D, Gale GA, Steinmetz R, Sukmasuang R, Bhumpakphan N, Grassman LI, Cutter P, Kitamura S, Reed DH, Baker MC, McShea W, Songsasen N, Leimgruber P (2013) Terrestrial activity patterns of wild cats from camera-trapping. *Raffles Bulletin of Zoology*, **61**, 407–415.
- Ma JZ (马建章), Chang H (常虹), Meng XL (孟宪林) (1989) Research and application of red deer dung distribution type. *Chinese Journal of Wildlife* (野生动物), (6), 2. (in Chinese)
- Marcus A, Andrew JH, Joanna R, Rahel S, Anderas W (2012) *Handbook for Wildlife Monitoring Using Camera-traps*. BBEC II Secretariat Publications, Sabah.
- Mills LS, Citta JJ, Lair KP, Schwartz MK, Tallmon DA (2000) Estimating animal abundance using noninvasive DNA sampling: promise and pitfalls. *Ecological Applications*, **10**, 383–394.
- Riordan P (1998) Unsupervised recognition of individual tigers and snow leopards from their footprints. *Animal Conservation*, **1**, 253–262.

- Rovero F, Marshall AR (2009) Camera trapping photographic rate as an index of density in forest ungulates. *Journal of Applied Ecology*, **46**, 1011–1017.
- Rowcliffe JM, Field J, Turvey ST, Carbone C (2008) Estimating animal density using camera traps without the need for individual recognition. *Journal of Applied Ecology*, **45**, 1228–1236.
- Soh YH, Carrasco LR, Miquelle DG, Jiang JS, Yang J, Stokes EJ, Tang JR, Kang AL, Liu PQ, Rao M (2014) Spatial correlates of livestock depredation by Amur tigers in Hunchun, China: relevance of prey density and implications for protected area management. *Biological Conservation*, **169**, 117–127.
- Stephens PA, Zaumyslova OY, Hayward GD, Miquelle DG (2006a) *Analysis of the Long-term Dynamics of Ungulates in Sikhote-Alin Reserve, Russian Far East*. A report to the Sikhote-Alin Zapovednik, USDA Forest Service and WCS.
- Stephens PA, Zaumyslova OY, Miquelle DG, Myslenkov AI, Hayward GD (2006b) Estimating population density from indirect sign: track counts and the Formozov-Malyshev-Pereleshin formula. *Animal Conservation*, **9**, 339–348.
- Wallace RB, Gomez H, Ayala G, Espinoza F (2003) Camera trapping for jaguar (*Panthera onca*) in the Tuichi Valley, Bolivia. *Journal of Neotropical Mammal*, **10**, 133–139.
- Yin YF, Drubgyal A, Lu Z, Sanderson J (2007) First photographs in nature of the Chinese mountain cat. *Cat News*, **47**, 6–7.
- Yudakov AG, Nikolaev IG (1987) *Ecology of the Amur Tiger: Winter Observations During 1970–1973 in the Western Section of Central Sikhote-Alin*. Nauka Press, Moscow.
- Zhang CZ (张常智), Zhang MH (张明海) (2011) Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **31**, 6481–6487. (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 YG (张于光), Li DQ (李迪强), Rao LQ (饶力群), Xiao QM (肖启明), Liu D (刘丹) (2003) Identification of polymorphic microsatellite DNA loci and paternity testing of Amur tiger. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), **49**, 118–123. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 蒋学龙 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附图1 利用Extract Compare V1.20对东北虎体侧图片构建三维表面模型

Fig. S1 Using the Extract Compare V1.20 to set the three-dimensional surface model of Amur tiger
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-079-1.pdf>

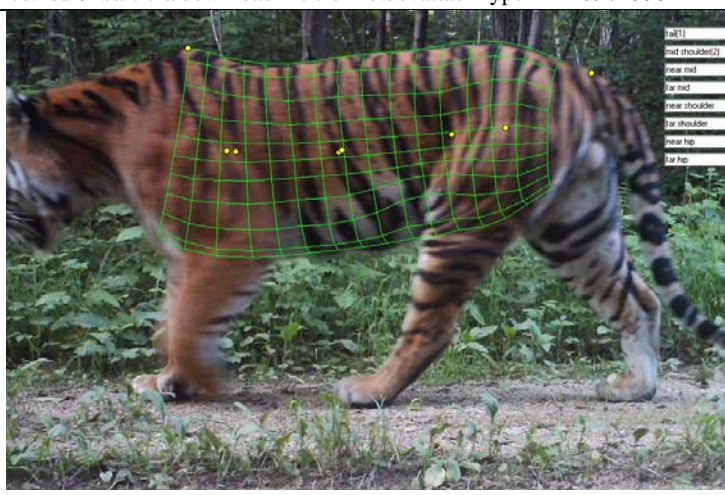
附图2 利用三维模型得到东北虎(a)与东北豹(b)的体侧平整图形并提取图形相对位置信息

Fig. S2 The flattened skin pattern of Amur tiger (a) and Amur leopard (b) extracted by the three-dimensional surface model
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-079-2.pdf>

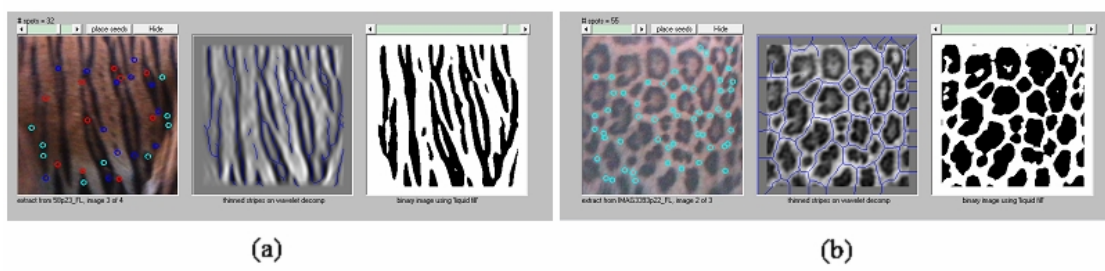
附图3 红外相机监测到的东北虎和东北豹。a, c, e为雌性东北虎个体, b, d为雄性东北虎个体, f, g为雌性东北豹个体。

Fig. S3 Five Amur tiger individuals were captured by camera traps, including three females (a, c, e) and two males (b, d). Two female Amur leopards (f, g) were captured by camera traps.
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-079-3.pdf>

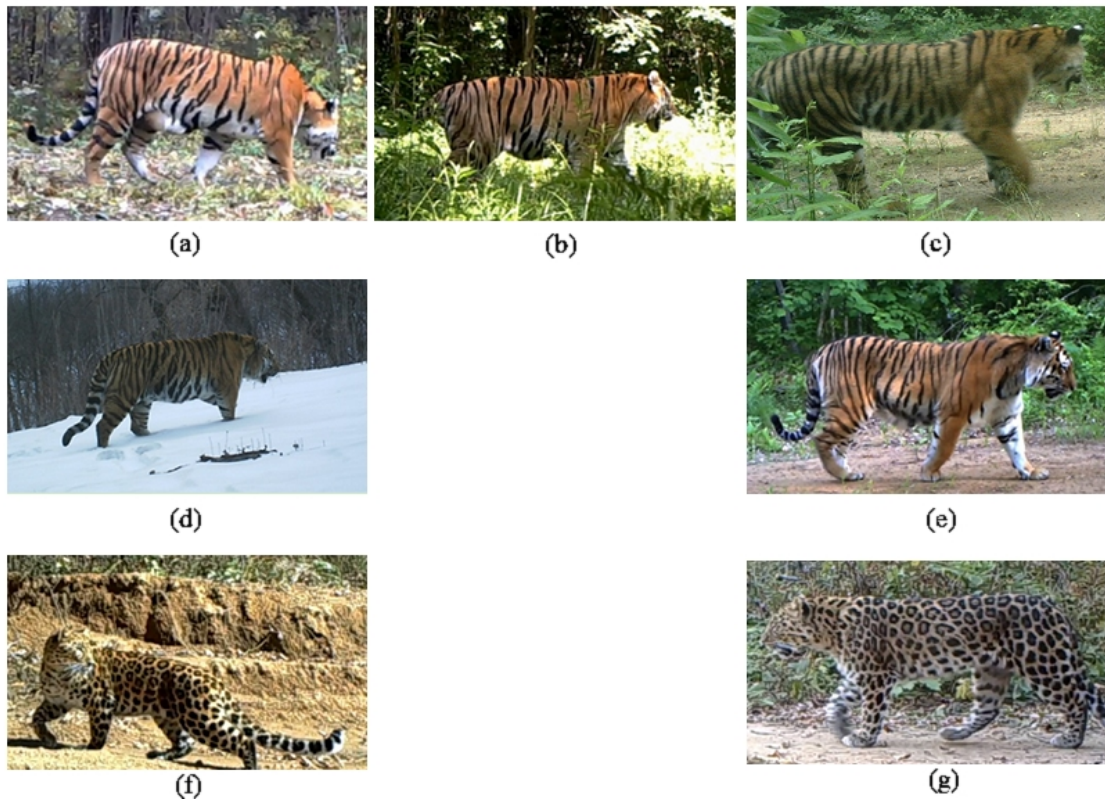
李治霖,康霭黎,郎建民, 薛延刚,任毅,朱志文,马建章,刘培琦,姜广顺. 探讨基于红外相机技术对大型猫科动物及其猎物的种群评估方法. 生物多样性, 2014, 22(6): 725-732.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=9934>



附图1 利用Extract Compare V1.20对东北虎体侧图片构建三维表面模型。黄色点为用来创建三维表面模型的“前肢”、“后肢”、“中间”等特殊点，睾丸的存在证明该东北虎为雄性
 Fig. S1 Using the Extract Compare V1.20 to set the three-dimensional surface model of Amur tiger. The yellow points are the special points for the model setting, the testis shows the Amur tiger is a male.



附图2 利用三维模型得到东北虎(a)与东北豹(b)的体侧平整图形并提取图形相对位置信息
 Fig. S2 The flattened skin pattern of Amur tiger (a) and Amur leopard (b) extracted by the three-dimensional surface model



附图3 红外相机监测到的东北虎和东北豹。a, c, e为雌性东北虎个体, b, d为雄性东北虎个体, f, g为雌性东北豹个体。
Fig. S3 Five Amur tiger individuals were captured by camera traps, including three females (a, c, e) and two males (b, d). Two female Amur leopards (f, g) were captured by camera traps.