



## 进展与综述 REVIEWS

## 大熊猫个体识别方法研究进展

周世强<sup>1</sup>, 李文静<sup>2</sup>, 严 啸<sup>1</sup>, 席清华<sup>2</sup>,  
李仁贵<sup>1</sup>, 张明春<sup>1</sup>, 杨 建<sup>1</sup>, 魏荣平<sup>1</sup>, 李德生<sup>1\*</sup>(1. 中国大熊猫保护研究中心, 大熊猫国家林业和草原局重点实验室, 成都 610081;  
2. 四川卧龙国家级自然保护区管理局, 汶川 623006)

## 稿件运行过程

收稿日期: 2025-04-30  
修回日期: 2025-05-25**关键词:** 大熊猫;  
个体识别;  
距离-咬节法;  
分子生物学法;  
面部识别法;  
热成像技术;  
被动声学监测法**Keywords:** Giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*);  
Individual identification;  
Distance and bite-size technique;  
Molecular biology method;  
Facial recognition technique;  
Thermal imaging technology;  
Passive acoustic monitoring method

中图分类号: Q958

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-04-0876-13

DOI: 10.12375/ysdwx.202504028

## 摘要

个体识别技术是大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)保护管理和科学研究的基础。自20世纪80年代开展大熊猫生态学研究及迁地保护以来,研究人员基于痕迹、影像和音频研发了距离-咬节法、分子生物学法、面部识别法、足迹影像法、热成像技术和被动声学监测法等个体识别方法。为此,本文整合评述了上述各类个体识别方法的原理、工作流程、优缺点,以及未来的发展方向与适用场景,以期为大熊猫的科学保护和国家公园的管理提供参考。

## Research Advances in Individual Identification Methods of Giant Pandas

ZHOU Shiqiang<sup>1</sup>, LI Wenjing<sup>2</sup>, YAN Xiao<sup>1</sup>,  
XI Qinghua<sup>2</sup>, LI Rengui<sup>1</sup>, ZHANG Mingchun<sup>1</sup>,  
YANG Jian<sup>1</sup>, WEI Rongping<sup>1</sup>, LI Desheng<sup>1\*</sup>(1. China Conservation and Research Centre for the Giant Panda, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on the Giant Panda, Chengdu 610081, China;  
2. Sichuan Wolong National Nature Reserve Administration, Wenchuan 623006, China)**基金项目:** 国家林业和草原局重点项目(中国绿化基金会 CGF2024001)**第一作者简介:** 周世强(1966—),男,教授级高级工程师;主要从事大熊猫保护生物学研究。E-mail: shiqiangzhou@sina.com**\* 通信作者:** 李德生, E-mail: lidesheng\_ccrcgp@163.com

**Abstract:** Individual identification technology is the basis of the conservation management and scientific research of giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*). Since the 1980s, when ecological research and *ex-situ* conservation of giant pandas were initiated, various identification methods have been developed based on traces, images, and visual/audio recordings. These include the distance and bite-size technique, molecular biology method, facial recognition technique, footprint identification technique, thermal imaging technology, and passive acoustic monitoring method. This paper comprehensively reviews the principles, workflows, advantages/disadvantages, future development directions, and applicable scenarios of these individual identification techniques. The synthesis aims to provide references for the scientific conservation of giant pandas and the management of Giant Panda National Park.

个体识别是野生动物行为生态学和种群数量、结构及其动态变化研究的核心,是濒危物种现状评估的数据来源,是自然保护地物种监测和栖息地管理的目标依据,也是圈养动物日常管理、档案建立和谱系编制的前提条件<sup>[1-5]</sup>。随着人工智能(AI)技术的迅猛发展,动物个体识别技术在模型算法和辨识精度方面不断更新与提升,显著提高了圈养繁殖动物的饲养管理效率和野生珍稀动物的自然保护能力<sup>[2-3]</sup>,诸如亚洲象(*Elephas maximus*)<sup>[6-8]</sup>、川金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)<sup>[9]</sup>、东北虎(*Panthera tigris altaica*)<sup>[10-12]</sup>、大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)<sup>[13]</sup>、喜马拉雅小熊猫(*Ailurus fulgens*)<sup>[14]</sup>、大猩猩(*Gorilla gorilla*)<sup>[15]</sup>,以及鸟类<sup>[16]</sup>、牛<sup>[17-18]</sup>和家猪<sup>[19]</sup>等个体识别的方法研究与应用。

大熊猫是我国国宝级的珍稀濒危动物,也是全球生物多样性保护中的旗舰物种。其野外种群数量的变动、分布栖息地的涨缩和圈养繁殖的盛衰都吸引着国内外公众、媒体和保护机构的极大关注<sup>[20-21]</sup>。在这一背景下,个体识别技术的准确性和可操作性成为大熊猫调查、监测和保护管理的关键,科研人员已提出了多种识别方法<sup>[1,20-23]</sup>。在此,基于我们掌握的文献资料和长期野外工作的经验与体会,对现有大熊猫个体识别方法进行综述与分析,以期为大熊猫的科学保护提供有益参考。

## 1 大熊猫个体识别方法的类型

自20世纪70年代末到80年代初,野生大熊猫分布区域的部分山系(邛崃山和岷山)发生大面积的竹子开花事件,导致大熊猫食物严重短缺,种群数量锐减<sup>[24]</sup>。此后,大熊猫种群数量变动、栖息地恢复及

主食竹状况成为社会各界及管理部门的关注焦点,尤其是大熊猫个体数量的波动更是重中之重<sup>[24-27]</sup>。从而人们探索了诸多大熊猫种群数量调查与估算方法,如直接计数法(又名哄赶法或围赶法)、样线调查法、密度参数计算法和数学模型估算法等,为大熊猫的保护管理和自然保护地的建设规划提供了理论依据<sup>[1,28]</sup>。种群数量估测与变化趋势分析是依据大熊猫的个体计数和年龄结构推算得出的,故大熊猫的个体识别是种群调查的基础与核心<sup>[29]</sup>。

概览40余年来大熊猫个体识别方法的发展历程,根据不同的角度和标准可以划分成不同的类别。

(1)根据取样技术是否对大熊猫造成伤害划分为损伤性方法(invasive method)和非损伤性方法(non-invasive method)。损伤性方法指为获取个体信息,通过诱捕方式采集样本并进行分子生物学检测,可能对大熊猫造成直接损伤或行为干扰的个体识别技术<sup>[30-31]</sup>;非损伤性方法则是通过间接途径获取样本和信息的技术,如收集粪便、毛发、足迹、食迹、影像或死亡个体组织等材料进行个体识别,该方法不会对大熊猫的行为和身体造成影响或伤害<sup>[1,20-23,28,32-35]</sup>。

(2)根据研究对象(取样材料)可以划分为基于痕迹、影像和音频的三类个体识别方法。基于痕迹的个体识别方法是指根据大熊猫的粪便、足迹、食迹,以及实体目测形态与行为差异进行个体区分的辨识方法,包括距离-咬节法(distance and bite-size technique, DBT)<sup>[1,20-23,28-29]</sup>、基于足迹特征的个体区分法、粪便形状和采食痕迹估测法<sup>[20-23]</sup>、形态和行为的视觉判定法,以及粪便DNA分子生物学方法(DNA-based approaches, DBA)<sup>[1,21-23,36-37]</sup>。基于影像

的个体识别方法是指根据光学相机、红外相机和机载设备获取的个体照片、足迹图像、视频片段或光谱成像,通过人工视觉和人工智能等方式进行个体区分的方法,包括面部识别法(facial recognition technique, FRT)(猫脸识别法)<sup>[38-45]</sup>和足迹影像法(footprint identification technique, FIT)<sup>[46]</sup>等。基于音频的个体识别方法(声纹识别法 voiceprint identification technique, VIT)是指根据野外或室内录制的声音,采用人工监听、专业设备(声谱仪)和智能软件进行个体识别或行为判定的方法,包括声音判定法和声谱分析法<sup>[47-50]</sup>。

(3)根据分析策略(面向思维)可以划分为人工视觉识别和人工智能深度学习两类方法。人工视觉识别是指根据野外或室内获取的大熊猫材料(包括样本、影像和数据等),通过人工检测和数据处理进行大熊猫个体识别的方法,如距离-咬节法<sup>[1, 20-23, 28-29]</sup>、图像视觉分辨法<sup>[38-46]</sup>和音频人工监听法<sup>[50]</sup>等。人工智能的深度学习是指对野外或室内获取的大熊猫数据(主要是影像),通过机器学习(人工智能)算法和模型进行个体识别的方法,如卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的个体识别法、基于VGGNet改进网络结构的多尺度大熊猫面部检测的个体识别法等<sup>[40-46, 51]</sup>。

(4)根据数据获取途径可以划分为地面获取数据法和空天获取数据法。地面获取数据法是指在大熊猫分布栖息地,通过人工、仪器和设备采集大熊猫样本,并进行样本分析和数据处理,从而进行个体识别的方法,包括样线法、红外相机法和粪便DNA法等<sup>[1, 20-23, 28-29, 32-34]</sup>。空天获取数据法是指利用卫星、无人机、飞机或热气球等航空航天工具搭载采集设备获取数据,通过遥感图像、红外光谱等影像分析进行个体识别的方法,包括卫星遥感技术、无人机技术、热气球技术和直升机航拍技术等。目前这些技术主要应用于栖息地质量与动态变化研究,在个体识别方面尚处于探索阶段。虽然相关研发和实验目前尚未见报道,但这些方法有望成为未来大熊猫个体识别的重要发展方向<sup>[52-56]</sup>。

## 2 大熊猫个体识别主要方法

### 2.1 基于痕迹的个体识别方法

大熊猫生活于茂密的森林环境中,种群数量稀少,种群密度仅为0.069~0.080只/km<sup>2</sup><sup>[20-22, 27]</sup>。在

野外环境下,直接观测实体极为困难,通常需借助间接调查方法来确定其地理分布和个体数量。为此,在大熊猫的调查与研究中,主要通过收集其活动后遗留的痕迹和实体样本进行统计和分析。大熊猫的痕迹类型包括粪便、毛发、食迹、足迹和卧穴等。在此,主要介绍距离-咬节法和分子生物学法(molecular biology method)这两种基于痕迹的个体识别方法。

#### 2.1.1 距离-咬节法

不同个体、年龄和性别的大熊猫采食行为和粪便形态存在差异,这些差异使得大熊猫粪便具备个体与年龄属性,从而可作为个体识别的依据<sup>[29, 34-35]</sup>。根据大熊猫粪便的大小和形状、采食竹子的残桩形态和高度(粪便形状和采食痕迹估测法),或根据影像中大熊猫的外观形态、行走步态和行为姿势等差异(形态和行为视觉判定法),来判断某一区域内大熊猫的不同个体。然而,这两种方法均需要丰富的野外经验和精湛的视觉分辨能力,因而限制了其普适性和推广性,仅适用于野外监测和饲养管理方面。

距离-咬节法的理论依据是动物家域理论(home range theory)和大熊猫特有的采食行为(foraging behavior)。家域理论认为,动物个体在长期生存过程中会形成较为固定的活动范围,在此区域内进行觅食、休息、繁殖和育幼等,仅在发情交配季节或自然灾害(如地震、洪水、滑坡、火灾和食物匮乏等)发生时才迁移到其他个体的领地,表现出具有个性特征的采食策略、生境选择和行为节律<sup>[57]</sup>。大熊猫在长期演化过程中特化成以亚高山竹类为主的专化采食策略,但其牙齿和消化道仍保留肉食动物的特征,致使竹子经过消化系统后仍保持较高的形态完整性,竹笋、竹竿和竹叶等构件仍可清晰辨识。尤其竹竿咬节(bamboo stem fragments, BSF)和竹叶残片的形态特征(如长度、咬痕)会因个体和年龄的不同而存在差异<sup>[29, 34-35]</sup>,这为个体识别提供了依据。

距离-咬节法的基本流程(图1):假设在某一调查区域内采集到两份粪便的咬节数据(至少30节)。第一步,根据样线调查记录,获取两份粪便的地理坐标,并计算两者之间的欧式距离。第二步,按照不同山系大熊猫的家域面积和日移动距离的综合平均值(秦岭山系平均家域面积10.62 km<sup>2</sup>,日移动距离0~3 km;其他山系平均家域面积6.00 km<sup>2</sup>,日移动距离500 m<sup>[30-31, 58-64]</sup>)和粪便的新鲜程度,人为设定大熊猫

的活动距离阈值:1天内为 $\leq 1.0$  km;1~3天为 $\leq 1.5$  km;4~15天为 $\leq 2.5$  km;15天以上为 $\leq 3.5$  km<sup>[20-23]</sup>。第三步,比较两粪便之间的欧式距离,如果大于活动距离阈值,则判定为不同个体;如果小于或等于活动距离阈值,则根据咬节的长短区分个体。第四步,从每

份粪便样品中随机抽取30~100竹竿咬节,统计其长度平均值。按照以往研究中获得的咬节长度区分阈值2.00 mm,比较两处粪便咬节平均值的差异,如果差异大于2.00 mm,判定为不同个体;如果小于或等于2.00 mm,则判定为同一只个体<sup>[20-23,28,33]</sup>。

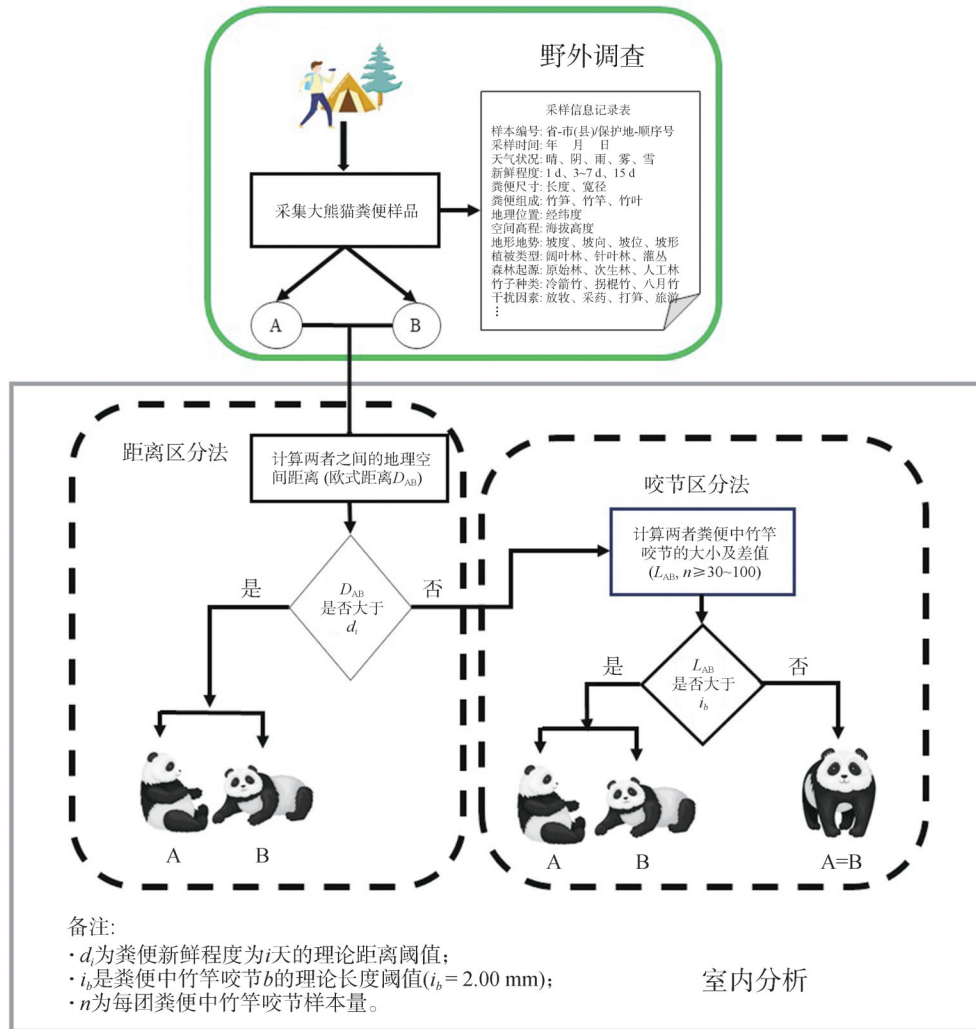


图1 距离-咬节法的分析流程图

Figure 1 Analysis flowchart of the distance-bite size method

### 2.1.2 分子生物学方法

动物个体识别的分子生物学方法主要基于高等生物基因组中的串联重复序列,包括小卫星DNA和微卫星DNA。针对这些序列,对应地采用分子生物学遗传标记监测技术分别为DNA指纹图谱技术和微卫星标记技术。分析所用材料包括粪便、毛发、血液或其他器官、组织等。其中,粪便和毛发在采样过程中不会对动物造成伤害或使其产生应激反应,成为常用的非损伤性样本类型,而粪便因其易得性和

信息丰富性被广泛应用<sup>[1,20,22-23,28,32,36-37,65-66]</sup>。动物粪便中残留的肠道脱落细胞携带遗传信息,为研究动物的分子遗传结构、种群生态学和行为生态学(如种群遗传特征、亲缘关系以及种间互作机制)等提供了重要依据<sup>[66-68]</sup>。为此,20世纪90年代初便兴起了一门新的学科——分子粪便学(molecular scatology)<sup>[69-71]</sup>。

微卫星DNA标记技术为目前应用最为广泛的大熊猫个体识别方法,以下将对其进行较为详细地阐述。微卫星DNA又称简单重复序列,其片段长度

小于 100 bp, 核心单位是 1 ~ 6 bp 的短核苷酸序列。该序列两端通常为相对保守的单拷贝序列, 且不同等位基因间的重复数存在显著差异, 这为动物的个体识别奠定了理论基础<sup>[1,72]</sup>。1995 年张亚平等<sup>[73]</sup>对大熊猫微卫星初次进行了筛选并应用于亲子鉴定, 2006 年 Zhan *et al.*<sup>[32]</sup>首次将微卫星 DNA 标记技术应用于四川王朗国家级自然保护区大熊猫种群数量调查中的个体识别, 2015 年 Huang *et al.*<sup>[65]</sup>通过扫描大

熊猫全基因组搜索和输出微卫星序列, 建立了大熊猫微卫星标记系统, 该系统包括 15 个具备多态性、稳定性和可重复性的四碱基微卫星, 而且以期望杂合度最高的 6 个位点建立了大熊猫个体识别方法。

大熊猫个体识别的粪便微卫星 DNA 分析方法主要技术流程包括野外样线设计与调查、样品收集、存储和运输, 以及室内分子生物学分析<sup>[32,65-73]</sup>(图 2)。具体步骤如下:

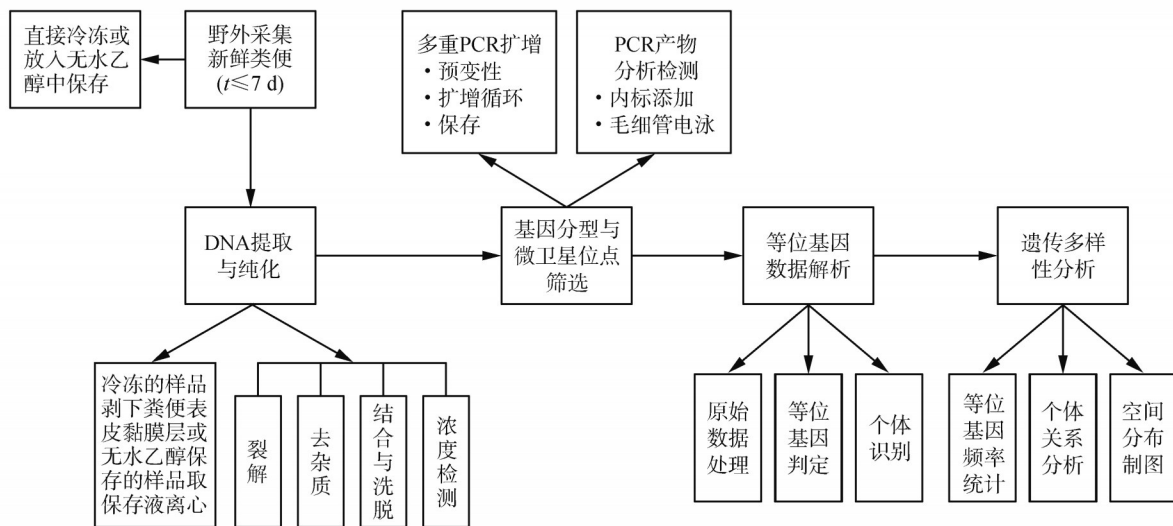


图 2 大熊猫粪便 DNA 个体识别技术操作流程

Figure 2 Technical workflow of individual giant panda identification using fecal DNA

(1) **DNA 提取**: 对于野外直接冷冻或新鲜完整粪便, 剥取约 0.2 g 粪便表面黏膜层; 对于无水乙醇保存的粪便样本, 先将保存液离心后取沉淀。其后, 采用 QIAamp DNA Stool Mini Kit 试剂盒提取大熊猫粪便 DNA。

(2) **基因分型及微卫星位点筛选**: 选取 12 ~ 15 个四碱基重复微卫星位点进行 PCR 基因分型和扩增。扩增程序为 95 °C 预变性 5 min, 94 °C 变性 50 s, 55 ~ 65 °C 退火 45 s, 72 °C 延伸 30 s, 35 个循环; 72 °C 终延伸 10 min。扩增完成后, 各取 5 μL PCR 产物, 用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳检测扩增是否成功, 根据电泳图来确定所获得的产物是否为条带单一、片段大小正确的 DNA 片段, 同时评估引物扩增效率。电泳检测结束后, 将 PCR 产物避光(使用锡箔纸盒)送公司进行后续检测。在基因分型前, 将每 3 个标记不同荧光引物的扩增产物根据产物浓度的大小按一定比例混合, 置于同一泳道进行电泳分型。所有样本在 377 DNA sequencer (ABI) 上进行基因分型, 通过

GeneMapper v3.2 软件确定各样本等位基因数, 以 ROX-500 (Peoplespot) 为分子内标判定等位基因大小。

(3) **个体识别**: 将各 DNA 微卫星位点的等位基因组合录入 Cervus 3.0 软件, 计算个体特异性概率值 (probability of identity value, PID), 若  $P_{ID} < 0.01\%$  (即至少有 8 个独立位点分型), 则判定为唯一个体。

(4) **遗传多样性分析**: 利用 Excel Microsatellite Toolkit v3.1 和 Fstat (v2.9) 软件分别计算圈养种群和野生种群的观测杂合度 (observed heterozygosity,  $H_o$ )、期望杂合度 (expected heterozygosity,  $H_e$ )、平均等位基因数 (average number of alleles per locus,  $A$ )、多态信息含量 (polymorphism information content, PIC) 和固定系数 (inbreeding coefficient,  $F_{IS}$ ), 以比较种群遗传多样性。个体亲缘关系分析基于亲缘系数 ( $r$  值) 排除重复样本 ( $r \geq 0.5$  判定为近亲)。最后, 结合 GPS 坐标, 利用 ArcGIS 绘制大熊猫个体活动热点与家域重叠区。

## 2.2 基于影像的个体识别方法

现代成像技术通过提供高精度影像数据(主要为数字图像)革新了野生动植物的物种鉴定方式。研究者可结合野外采集的动植物影像资料(照片、视频),利用《中国高等植物彩色图鉴》<sup>[74]</sup>和《中国兽类图鉴》<sup>[75]</sup>等工具书,或生物通、花伴侣等专业APP进行物种鉴定。其中,以数码影像技术(如自动相机监测技术 automated camera monitoring technology)为代表的自动化监测手段,凭借其全天候、全时段、非侵入和长时间监测的特性,显著提升了对数量稀少、活动隐秘、抗干扰弱的珍稀濒危物种的生态学研究效率,并为解析动物行为模式及个体识别积累了大量基础数据<sup>[76-78]</sup>。

对于野外红外相机拍摄的影像数据,最初主要依靠人工视觉进行物种辨识和个体识别(传统的形态识别方法)。该方法通过分析动物躯体斑纹的形状、大小和数量等特征实现个体鉴别(身纹识别法 stripes/spots identification method, SIM),主要适用于体表具有显著斑纹的动物,如东北虎<sup>[10-11]</sup>,其应用范围相对有限。随着计算机视觉技术的发展,研究者开发了根据动物的面部特征、姿态行为和足迹图像进行视觉判定,或通过机器学习技术检测图像并识别个体的方法,如面部识别法<sup>[38,40-45]</sup>、姿态行为估测法(pose estimation methods, PEM)<sup>[39]</sup>和足迹影像法<sup>[46]</sup>等。这些方法也广泛应用于川金丝猴<sup>[79]</sup>、白犀(*Ceratotherium simum*)<sup>[80]</sup>、东北虎<sup>[81]</sup>和黑犀(*Diceros bicornis*)<sup>[82]</sup>等野生和圈养动物的个体识别。近年来,热成像技术与无人机、轻型航空器的创新集成革新了野生动物监测体系。通过搭载热红外传感器系统可全天候获取动物体温辐射特征,并结合AI算法实现物种辨识、个体追踪及行为分析。典型案例包括根据热特征识别川金丝猴和驼鹿(*Alces alces*)的个体身份与健康状态<sup>[52,54]</sup>,结合LiDAR(light detection and ranging)数据对藏野驴(*Equus kiang*)进行个体计数<sup>[53]</sup>,以及利用无人机热成像监测海南长臂猿(*Nomascus hainanus*)的种群空间分布与夜栖行为<sup>[55-56]</sup>。然而,因大熊猫热特征模糊、生境复杂和行为模式差异等原因,热成像技术在该物种的个体识别中尚无成功应用的案例。有鉴于此,本文后续重点介绍基于图像的大熊猫个体识别法,尤其聚焦于面部识别技术。

面部识别法,又称猫脸识别法,是根据大熊猫的

面部形态大小、颜色深浅和五官轮廓等外形特征,通过机器深度学习模型,对圈养(人工拍摄)或野外(红外相机)获得的图像进行个体识别的方法。其主要工作流程包括三个步骤<sup>[9-12,16-17,38-45]</sup>:第一步是图像获取与预处理。对圈养环境中生活的大熊猫个体进行面部图像抓拍,如借助于光学数码相机、视频监控系统对大熊猫拍摄“大头贴”,或野外利用红外感应数码相机监测大熊猫活动,录拍大熊猫视频和照片。选择面部完整的图像,在室内进行图像背景去除、面部区域标记和图像标签标注等预处理操作。第二步是图像识别。该步骤的核心是构建自动图像识别模型。现有研究大致可以分为三类,即基于面部拓扑特征的识别方法(采用人工设置特征提取器的传统方法)、基于代数特征的识别方法(如主成分分析),以及基于机器学习理论的识别方法(如卷积神经网络)<sup>[42]</sup>。第三步是模型训练与个体识别。从数据集中抽取一定比例的数据用于机器学习模型训练,随后利用训练好的模型对现实数据或预留数据集进行检测,以验证模型在大熊猫个体识别中的可靠性与准确率。大熊猫面部识别方法的关键在于自动检测模型的算法选择。不同的算法个体识别率存在差异。利用发育网络(development network)的目标检测方法,在完全除去背景和保留部分背景的条件下,识别率分别为58.82%和79.41%<sup>[42]</sup>;基于卷积神经网络模型的识别方法对圈养大熊猫的个体识别率可达98%以上<sup>[40-41]</sup>;通过改进现有的人脸识别模型(如FaceNet),将其主干网络替换为Inception-ResNet-v1,并添加风格注意力模块(style-based recalibration module, SRM)和可分离卷积层,显著提升了特征提取能力,该方法在圈养和野生大熊猫数据集上的识别准确率分别达到95.1%和91.0%<sup>[38]</sup>;成都大熊猫繁育研究基地开发的大熊猫个体识别系统,通过多角度图像采集和数据库比对,实现了圈养大熊猫96.27%的个体识别准确率<sup>[43]</sup>。

## 2.3 基于音频的个体识别方法

声音是动物种群内和个体间最具有显著性、灵活性和长距离传输等特性的通讯方式之一。不同物种之间、同一物种的不同个体之间,以及动物在不同生理状态(如发情、交配、妊娠、母幼交流和疾病感染等)下,其发声特征均存在差异<sup>[83]</sup>。据此,研究者可利用自动监测设备(如被动声学监测 passive acoustic monitoring, PAM)结合机器学习模型,非侵入性地

解析动物声音中所蕴含的信息,包括声源动物的种群丰度、种类、性别、个体身份、健康状况、位置、体型和信源动机等,并可进一步评估监测区域的生物多样性(以动物多样性为主),从而形成了一门新的学科——声景生态学(soundscape ecology)<sup>[84-88]</sup>。

大熊猫的声音类型及其所表达的信息极其丰富。20世纪80年代,采用声谱仪分析发现,成年大熊猫能发出11种轻、浊音,如“牛叫”“尖叫”“咩叫”“呼气”“鼓鼻”“咆哮”“嗷嗷叫”等,且不同叫声具有特定的行为功能,根据其叫声可推断大熊猫发情处于高潮期或低潮期<sup>[30-31,47-48,88]</sup>。周小平等<sup>[89]</sup>总结1996—2005年与美国圣迭戈动物园协会合作进行圈养大熊猫行为研究的成果时,在大熊猫行为谱中列出了“咩叫”“鸟叫”“咆哮”等14种叫声及其行为定义。2006年以后,中外研究人员对圈养大熊猫的声音开展了深入和广泛的研究,内容涵盖通讯模式、行为功能、行为类型、个体身份、叫声分析,以及预测大熊猫的交配成功与否等多个方面<sup>[90-93]</sup>。此外,通过为野化培训中的大熊猫幼仔佩戴具有录音功能的音频项圈,探究其在野外环境的适应能力及行为表现,为大熊猫野化训练成效的评估提供了重要依据<sup>[50]</sup>。虽然这些研究涉及到大熊猫的个体身份信息表征,但是尚未实现真正意义上的个体识别,尤其是针对野生大熊猫的声音研究更是少之又少,这将成为今后研究的方向和攻克的难点。

### 3 大熊猫个体识别方法的优缺点评价及展望

大熊猫个体识别研究经过40余年的探索与创新,已发展出基于痕迹、图像和音频的多种个体识别方法。目前常用的方法主要包括距离-咬节法、分子生物学方法和面部识别法,而足迹影像法、热成像技术和被动声学监测法等仍处于研发和试验阶段。由于各类方法在原理基础、使用材料、采样途径和应用场景等方面存在差异,它们各自具有独特的优势和局限,也面临不同的发展方向。

在基于痕迹的个体识别方法中,依据粪便形状与大小、足迹和食迹(如竹子残桩)的形态特征、实体外貌轮廓等进行个体识别方法,具有快捷、简单的优点,但其缺点在于对辨识人员的野外经验和细节洞察力要求较高,且仅适用于局部区域的大熊猫种群监测,结果误差较大,推广价值有限,缺乏统计学意

义。距离-咬节法则具备易掌握、好推广的特点,适用于监测保护地内大熊猫种群动态、栖息地质量变化和生态廊道建设成效评估<sup>[1,20-31,33-35,37,64]</sup>。该方法未来需解决的关键问题是根据最新GPS项圈跟踪研究成果(大熊猫活动距离和家域面积),确定最佳距离判定阈值;同时,引入高精度测量工具,探究竹竿咬节的长度区分阈值,从而提升该方法在大熊猫种群监测和保护地巡护管理中的应用效能。

分子生物学方法(微卫星DNA法)是建立在遗传理论基础上的科学方法。该方法能够较为精确地鉴定大熊猫个体、区分性别,并可用于评估调查区域的遗传多样性、分析种群间基因交流及物种扩散格局等,从而为制定野生大熊猫保护策略、规划栖息地和建设生态廊道提供至关重要的依据。该方法的缺点是粪便的新鲜程度随时间推移而降低,DNA的降解率较高,因此需要采集非常新鲜的粪便样本,这为野外采样工作带来严重挑战。此外,如何获取高质量的粪便样本、简化DNA提取程序,以及降低调查和测试成本是解决分子生物学法推广的关键<sup>[1,20-23,32,36-37,67,69-70,94]</sup>。未来,分子生物学方法需要大力推广粪便样本存储试剂,研发流程简化、易操作的DNA提取技术,以及价格低廉、精度高和推广性强的通用试剂盒,并建立大熊猫遗传数据库,实现自然保护地管理机构和科研单位之间的数据共享与查询。

基于影像的个体识别方法目前主要利用圈养大熊猫的影像(多为照片)作为机器学习(人工智能)的测试与验证数据,仅有少数研究采用红外相机陷阱所拍摄的野生大熊猫影像。相关研究多集中于进行“猫脸识别法”神经网络模型的构建与识别准确率的提升<sup>[38-45]</sup>。该类方法对圈养大熊猫具有较高的识别率和准确性;对野生大熊猫来说,红外相机技术虽具有全天候、长时段和非侵入地获取图像的优势,但也存在获取完整且无偏差图像困难、可用于机器训练的图像数据量有限等问题,制约了AI模型训练的效果和泛化水平。在实际应用中,猫脸识别法存在一定的现实短板。其一,不同山系大熊猫的毛色(如秦岭山系大熊猫的棕色、邛崃山系大熊猫的白化和普通大熊猫的黑白相间)<sup>[95-96]</sup>及头形结构差异(如邛崃山系头长似熊、秦岭山系头圆像猫)<sup>[97-98]</sup>对于图像识别算法的准确率具有影响,制约了算法和模型的普适性。其二,地形地势差异可能造成不同地理区域

图像识别的误差增大,需针对研究区域的地形(如高山峡谷、夷平地等)构建相应的识别模型。其三,图像获取方式与拍摄时段影响大熊猫个体的识别效果。其四,随着大熊猫个体发育,其体型、毛色和头部形态会发生相应改变。如果采用相同的一套识别模型进行全龄段个体识别,将导致准确率下降,从而降低幼体至亚成体、成体特征匹配率。其五,季节气候变化同样影响图像获取的完整性和识别准确率。此外,红外相机布设数量有限,所识别个体多局限于相机布设区域,难以评估整个地区(研究区域、自然保护区和国家公园)内大熊猫的种群数量及其动态。红外相机捕获的不同运动状态下的大熊猫影像,其识别准确率之间差异较大,例如运动模糊图像的误识别率通常低于静止清晰图像。红外相机的电池使用寿命较短(通常 $\leq 3$ 个月),如果需要获得清晰度更高、更多的影像资料,则耗电更快,更换电池频率增加,导致数据下载和更换电池费力费时,并且可能对大熊猫及其栖息地造成人为干扰。虽然现在已有远程传输、太阳能供电的红外相机系统,可能解决数据下载和电池更换难题,但成本相对较高,可能加重保护地或研究机构的财政负担。从保护场景需求而言,应用于不同保护场景的技术要求不同:日常巡逻需提高红外相机的实时性;放归个体跟踪则强调机器学习算法的稳定性,以保证追踪数据的准确率;种群调查监测不仅需提高个体识别率,还应增强群体识别准确率,以便有效监测区域种群的动态特征。

同为基于图像的个体识别方法,足迹影像法的优势在于非侵入性数据采集及对低分辨率图像的适应性,但需依赖清晰的足迹印痕与稳定的基质条件(如松软泥土)。目前该方法在大熊猫研究中尚处于探索阶段,仅实现了对圈养个体足迹的性别判别与初步个体识别<sup>[46]</sup>,这主要受限于野生环境的复杂多变、大熊猫足迹易被植被覆盖或雨水冲刷的影响。具体而言,在枯枝落叶层厚、地被植物茂密和竹林密集的典型栖息地中,大熊猫仅能在湿地、软土或雪地上留下可以辨识的足迹。然而,这些足迹又常被枯枝落叶或新的积雪所掩盖,导致可用于个体识别的清晰、完整足迹数量极其稀少。此外,获取大熊猫足迹需要耗费大量人力和财力,加之雪天野外作业风险高、工作效率低,进一步限制了该方法的实际应用与推广。

借助无人机、热气球和小型飞机等飞行工具搭

载热成像设备,飞临野生动物生活的栖息地进行红外成像,从而进行区域内的动物个体识别和种群数量调查。这种方法适用于树栖动物(如川金丝猴<sup>[52]</sup>、海南长臂猿<sup>[55-56]</sup>)和稀树草原、高原草地或戈壁沙漠的动物(如藏野驴<sup>[53]</sup>),以及偶尔活动于空旷区域的森林动物(如驼鹿<sup>[54]</sup>)等。热成像技术的优势在于全天候监测、群体覆盖广,其局限性为热信号衰减、设备成本高。目前该技术对森林动物的适合度较低,主要由于茂密林冠与复杂地形会消减热成像效果,且无人机或轻型航空器在动物活动区域的飞行可能干扰野生动物行为。该方法在大熊猫个体识别方面正处于研发和试验阶段,目前没有成功案例,其优势和劣势难以评述。但从大熊猫的生存环境(如高大茂密的森林、厚重密实的竹层、崎岖陡峭的地形及丰富的生物多样性)<sup>[20-21]</sup>与大熊猫独特的生理生态特性(低能量代谢、长时间休息和晨昏活动模式)<sup>[29-31,99]</sup>分析,要想实现对一个区域内大熊猫种群数量的快速评估并非易事,热成像技术的实际效果有待进一步观察。为此,未来基于图像的个体识别方法研究的主要方向是优化机器学习算法与模型,提高个体识别准确率,建立海量大熊猫图像数据库;积极探索热成像技术在大熊猫个体识别中的可行性,并优化轻量化模型和边缘计算设备,以满足野外复杂环境下的实时识别需求。

基于音频的个体识别方法(被动声学监测法)优势在于人们可通过声音解析大熊猫个体的生理状况(如发情、妊娠、产仔和育幼等)、健康状况、行为表现(如走动、采食、休息和饮水等),以及与其他个体(雌雄、母幼)的互动关系。虽然该技术已较为成熟,并广泛应用于其他动物和生物多样性监测,但在大熊猫个体识别(尤其是野外种群)方面尚无成功案例,其关键难点在于野外声音收集和多种声音剥离等方面<sup>[47-50,90-93]</sup>。未来,基于音频的个体识别方法应重点发展多模态融合技术,将行为识别模型(如进食、攀爬等)与个体识别技术相结合,以提升监测的全面性;同时需研发适用于野外环境采集大熊猫声音的设备和剥离多种声音的技术。

个体识别技术在大熊猫保护管理和科学研究中发挥着极其重要的作用,其为评估保护策略的科学性和可行性提供了依据,也为栖息地廊道建设和野化放归规划奠定了基础。本文系统梳理了大熊猫个体识别方法的主要类型、原理以及发展历程,贯穿整

个大熊猫研究史;全面评估了各类方法的优势与局限,并提出了未来技术突破的方向,旨在为后续大熊猫研究提供方法学参考。

### 参考文献:

- [1] 史雪威,张晋东,欧阳志云. 野生大熊猫种群数量调查方法研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7528-7537.  
SHI X W, ZHANG J D, OUYANG Z Y. Research progress on population investigation methods for wild giant panda [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7528-7537.
- [2] 张丽霞,卫泽珍,李金邦,等. 动物个体识别方法种种[J]. 野生动物学报, 2015, 36(4): 475-478.  
ZHANG L X, WEI Z Z, LI J B, *et al.* Differential method for animal individual identification [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2015, 36(4): 475-478.
- [3] 钟俊杰,钮冰,陈沁,等. 深度学习在野生动物保护中的应用[J]. 兽类学报, 2023, 43(6): 734-744.  
ZHONG J J, NIU B, CHEN Q, *et al.* Application of deep learning in wildlife conservation [J]. Acta Theriologica Sinica, 2023, 43(6): 734-744.
- [4] POLLARD K A, BLUMSTEIN D T, GRIFFIN S C. Pre-screening acoustic and other natural signatures for use in noninvasive individual identification [J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 47(5): 1103-1109.
- [5] CHEEMA G S, ANAND S. Automatic detection and recognition of individuals in patterned species [C]//ALTUN Y, DAS K, MIELIKÄINEN T, *et al.* Machine learning and knowledge discovery in databases: European conference, ECML PKDD 2017, Skopje, Macedonia, September 18-22, 2017, Proceedings, Part III. Cham: Springer, 2017: 27-38.
- [6] 保明伟,韩泳,熊朝永,等. 西双版纳野象谷亚洲象个体识别及种群数量特征[J]. 野生动物学报, 2024, 45(3): 472-479.  
BAO M W, HAN Y, XIONG C Y, *et al.* Individual identification and population quantitative characteristics of Asian elephant in the Wild Elephant Valley, Xishuangbanna [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2024, 45(3): 472-479.
- [7] 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(1): 18-27.  
YANG Z C, CHEN Y, LI J S, *et al.* Individual identification and population size assessment for Asian elephant based on camera-trapping techniques [J]. Acta Theriologica Sinica, 2018, 38(1): 18-27.
- [8] 袁志强,张立. 西双版纳三岔河地区野生亚洲象的个体识别、种群数量和活动特点[J]. 兽类学报, 2006, 26(4): 359-367.  
YUAN Z Q, ZHANG L. Population and activity characteristic of wild Asian elephants in the Wild Elephant Valley, Xishuangbanna National Nature Reserve, Yunnan, China [J]. Acta Theriologica Sinica, 2006, 26(4): 359-367.
- [9] 方楠. 基于CNN的金丝猴面部识别研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- FANG N. Research and implement of gold monkey recognition based on convolutional neural network [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [10] 顾佳音,刘辉,姜广顺. 东北虎(*Panthera tigris altaica*)个体识别技术研究进展[J]. 野生动物, 2013, 34(4): 229-237;248.  
GU J Y, LIU H, JIANG G S. A review of potential techniques for indentifying individual Amur tigers (*Panthera tigris altaica*) [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2013, 34(4): 229-237;248.
- [11] 史春妹,谢佳君,顾佳音,等. 基于目标检测的东北虎个体自动识别[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4685-4693.  
SHI C M, XIE J J, GU J Y, *et al.* Amur tiger individual automatic identification based on object detection [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4685-4693.
- [12] SHI C M, LIU D, CUI Y L, *et al.* Amur tiger stripes: Individual identification based on deep convolutional neural network [J]. Integrative Zoology, 2020, 15(6): 461-470.
- [13] WANG L, DING R Z, ZHAI Y H, *et al.* Giant panda identification [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 2837-2849.
- [14] HE Q, ZHAO Q J, LIU N, *et al.* Distinguishing individual red pandas from their faces [C]//LIN Z C, WANG L, YANG J, *et al.* Pattern recognition and computer vision: Second Chinese conference, PRCV 2019, Xi'an, China, November 8-11, Proceedings, Part II. Cham: Springer, 2019: 714-724.
- [15] BRUST C A, BURGHARDT T, GROENENBERG M, *et al.* Towards automated visual monitoring of individual gorillas in the wild [C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), October 22-29, 2017. Venice: IEEE, 2017: 2820-2830.
- [16] 李柏灿,张军国,张长春,等. 基于TC-YOLO模型的北京珍稀鸟类识别方法[J]. 生物多样性, 2024, 32(5): 127-141.  
LI B C, ZHANG J G, ZHANG C C, *et al.* Rare bird recognition method in Beijing based on TC-YOLO model [J]. Biodiversity Science, 2024, 32(5): 127-141.
- [17] 赵凯旋,何东健. 基于卷积神经网络的奶牛个体身份识别方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 181-187.  
ZHAO K X, HE D J. Recognition of individual dairy cattle based on convolutional neural networks [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 181-187.
- [18] QIAO Y L, SU D, KONG H, *et al.* Individual cattle identification using a deep learning based framework [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(30): 318-323.
- [19] HANSEN M F, SMITH M L, SMITH L N, *et al.* Towards on-farm pig face recognition using convolutional neural networks [J]. Computers in Industry, 2018, 98: 145-152.
- [20] 国家林业和草原局. 全国第四次大熊猫调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 10-23.  
National Forestry and Grassland Administration. The 4th national survey report on giant panda in China [M]. Beijing: Science Press, 2021: 10-23.

- ence Press, 2021: 10–23
- [21] 国家林业局. 全国第三次大熊猫调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 11–26.  
State Forestry Administration. The 3rd national survey report on giant panda in China [M]. Beijing: Science Press, 2006: 11–26.
- [22] 唐小平, 贾建生, 王志臣, 等. 全国第四次大熊猫调查方案设计及其主要结果分析[J]. 林业资源管理, 2015(1): 11–16.  
TANG X P, JIA J S, WANG Z C, *et al.* Scheme design and main result analysis of the fourth national survey on giant pandas [J]. Forest Resources Management, 2015(1): 11–16.
- [23] 张晋东, 李玉杰, 王玉君, 等. 野生大熊猫种群数量两种调查方法对比[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(6): 1142–1147.  
ZHANG J D, LI Y J, WANG Y J, *et al.* Comparison of two investigation methods for population of wild giant pandas [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(6): 1142–1147.
- [24] 秦自生. 四川大熊猫的生态环境及主食竹种更新[J]. 竹子研究汇刊, 1985, 4(1): 1–10.  
QIN Z S. Giant panda's bamboo food resources in Sichuan, China and the regeneration of the bamboo groves [J]. Journal of Bamboo Research, 1985, 4(1): 1–10.
- [25] O'BRIEN S J, KNIGHT J A. The future of the giant panda [J]. Nature, 1987, 325(6107): 758–759.
- [26] CAMPBELL J J N, QIN Z S. Interaction of giant pandas, bamboos and people [J]. Journal of American Bamboo Society, 1983, 4(1/2): 1–35.
- [27] 中华人民共和国林业部, 世界野生生物基金会. 中国大熊猫及其栖息地综合考察报告[R]. 成都: [出版者不详], 1989: 10–159.  
Ministry of Forestry of People's Republic of China, World Wildlife Fund (WWF). Comprehensive survey report on China's giant pandas and its habitats [R]. Chengdu: [s. n.], 1989: 10–159.
- [28] 周世强, 屈元元, 黄金燕, 等. 野生大熊猫种群动态的研究综述[J]. 四川林业科技, 2017, 38(2): 17–30.  
ZHOU S Q, QU Y Y, HUANG J Y, *et al.* A summary of researches on the wild giant panda population dynamics [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2017, 38(2): 17–30.
- [29] 胡锦矗. 从野外大熊猫的粪便估计年龄及其种群年龄结构的研究[J]. 兽类学报, 1987, 7(2): 81–84.  
HU J C. A study on the age and population composition of the giant panda by judging droppings in the wild [J]. Acta Theriologica Sinica, 1987, 7(2): 81–84.
- [30] 胡锦矗, 夏勒, 潘文石, 等. 卧龙的大熊猫[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1985: 33–129.  
HU J C, SCHALLER G B, PAN W S, *et al.* Wolong's giant panda [M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 1985: 33–129.
- [31] SCHALLER G B, HU J C, PAN W S, *et al.* The giant pandas of Wolong [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1985: 49–169.
- [32] ZHAN X J, LI M, ZHANG Z J, *et al.* Molecular censusing doubles giant panda population estimate in a key nature reserve [J]. Current Biology, 2006, 16(12): R451–R452.
- [33] 黄秉明, 胡锦矗. 野外大熊猫调查方法的研究[J]. 四川师范学院学报, 1989, 10(1): 93–99.  
HUANG C M, HU J C. A survey method of wild giant pandas [J]. Journal Sichuan Teach College, 1989, 10(1): 93–99.
- [34] 尹玉峰, 王昊, 陈艾, 等. 对大熊猫数量调查方法中咬节区分机制的准确性评价[J]. 生物多样性, 2005, 13(5): 439–444.  
YIN Y F, WANG H, CHEN A, *et al.* Accuracy assessment of the bamboo stem fragment distinguishing method used in panda population surveys [J]. Biodiversity Science, 2005, 13(5): 439–444.
- [35] 魏荣平, 张贵权, 王鹏彦, 等. 大熊猫粪便中竹子咬节长短与年龄和种群数量关系[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2153–2162.  
WEI R P, ZHANG G Q, WANG P Y, *et al.* Relation of bite size in feces with age and population number of giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2153–2162.
- [36] 方盛国, 陈冠群, 冯文和, 等. 大熊猫DNA指纹在野生种群数量调查中的应用[J]. 兽类学报, 1996, 16(4): 246–249;320.  
FANG S G, CHEN G Q, FENG W H, *et al.* DNA fingerprinting applied to the investigation of wild population of giant panda [J]. Acta Theriologica Sinica, 1996, 16(4): 246–249;320.
- [37] 方盛国, 冯文和, 张安居. 大熊猫基因指纹探针 F<sub>2</sub>ZGP96060801 的研制及比较实验分析[J]. 兽类学报, 1997, 17(3): 165–171; 237–238.  
FANG S G, FENG W H, ZHANG A J. The developing of giant panda DNA fingerprinting probe F<sub>2</sub>ZGP96060801 and the comparative test analysis of 5 probes [J]. Acta Theriologica Sinica, 1997, 17(3): 165–171; 237–238.
- [38] 陈雯. 基于图像对比的大熊猫个体识别方法研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2023.  
CHEN W. Research on giant panda individual recognition method based on image contrast [D]. Nanchong: China West Normal University, 2023.
- [39] 董星辰. 有遮挡的多姿态大熊猫个体识别关键技术研究及系统实现[D]. 成都: 四川师范大学, 2024.  
DONG X C. Research and system implementation of key technologies for occluded multi-pose giant panda recognition [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2024.
- [40] 何育欣. 基于卷积神经网络的大熊猫检测与个体识别研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2020.  
HE Y X. Research on detection and individual recognition of giant pandas based on convolutional neural network [D]. Nan-

- chong; China West Normal University, 2020.
- [41] 何育欣, 郑伯川, 谭代伦, 等. 基于VGGNet改进网络结构的多尺度大熊猫面部检测[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(11): 63-71.  
HE Y X, ZHENG B C, TAN D L, *et al.* Multi-scale giant panda face detection based on the improved VGGNet architecture [J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(11): 63-71.
- [42] 侯金, 郑伯川, 李玉杰, 等. 基于发育网络识别模型的大熊猫面部识别[J]. 兽类学报, 2019, 39(1): 43-51.  
HOU J, ZHENG B C, LI Y J, *et al.* Facial recognition of giant pandas based on developmental network recognition model [J]. Acta Theriologica Sinica, 2019, 39(1): 43-51.
- [43] CHEN P, SWARUP P, WOJCIECH M M, *et al.* A study on giant panda recognition based on images of a large proportion of captive pandas [J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(7): 3561-3573.
- [44] CHEN W, ZHENG B C, ZHANG J D, *et al.* Giant panda face recognition based on PandaFaceNet [J]. Ecological Informatics, 2023, 77: 102225.
- [45] HOU J, HE Y X, YANG H B, *et al.* Identification of animal individuals using deep learning: a case study of giant panda [J]. Biological Conservation, 2020, 242: 108414.
- [46] LI B V, ALIBHAI S, JEWELL Z, *et al.* Using footprints to identify and sex giant pandas [J]. Biological Conservation, 2018, 218: 83-90.
- [47] 赵灿南, 王鹏彦, 王安群. 利用大熊猫叫声推断大熊猫发情高潮期及催情的初探[J]. 大自然探索, 1988, 7(2): 93-99.  
ZHAO C N, WANG P Y, WANG A Q. Exploring of making use of calls to infer peak oestrus and to promote oestrus in giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) [J]. Exploration of Nature, 1988, 7(2): 93-99.
- [48] 赵灿南, 王鹏彦. 大熊猫幼仔叫声的声谱分析[J]. 大自然探索, 1988, 7(2): 99-102.  
ZHAO C N, WANG P Y. The sound spectrum analysis of calls in teh baby giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) [J]. Exploration of Nature, 1988, 7(2): 99-102.
- [49] CHARLTON B D, HUANG Y, SWAISGOOD R R. Vocal discrimination of potential mates by female giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) [J]. Biology Letters, 2009, 5(5): 597-599.
- [50] YAN X, ZHANG H M, LI D S, *et al.* Acoustic recordings provide detailed information regarding the behavior of cryptic wildlife to support conservation translocations [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 5172.
- [51] VÉLEZ J, MCSHEA W, SHAMON H, *et al.* An evaluation of platforms for processing camera-trap data using artificial intelligence [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2023, 14(2): 459-477.
- [52] 央视社教. 秦岭科考: 首次利用热成像技术实现金丝猴种群调查[EB/OL] (2022-11-02) [2025-03-10]. <https://news.qq.com/rain/a/20221102A04P2I00>.
- CCTV Social Education. Qinling scientific expedition: First use of thermal imaging technology for golden snub-nosed monkey population survey [EB/OL] (2022-11-02) [2025-03-10]. <https://news.qq.com/rain/a/20221102A04P2I00>.
- [53] 郭兴健, 邵全琴. 基于无人机遥感的三江源国家公园藏野驴种群数量及生境时空变化研究[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7886-7895.  
GUO X J, SHAO Q Q. Population of kiangs and spatio-temporal variation of its habitat in Sanjiangyuan National Park based on unmanned aerial vehicle remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7886-7895.
- [54] 王劭文, 王东亮, 凌成星, 等. 基于无人机遥感的黑龙江南瓮河国家级自然保护区驼鹿种群数量及空间分布调查[J]. 野生动物学报, 2023, 44(3): 486-493.  
WANG S W, WANG D L, LING C X, *et al.* Population and spatial distribution of moose in Nanwenghe National Nature Reserve, Heilongjiang Province based on unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2023, 44(3): 486-493.
- [55] ZHANG H, TURVEY S T, PANDEY S P, *et al.* Commercial drones can provide accurate and effective monitoring of the world's rarest primate [J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2023, 9(6): 775-786.
- [56] ZHANG H, WANG C, TURVEY S T, *et al.* Thermal infrared imaging from drones can detect individuals and nocturnal behavior of the world's rarest primate [J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01101.
- [57] 张晋东, HULL V, 欧阳志云. 家域研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3269-3279.  
ZHANG J D, HULL V, OUYANG Z Y. A review of home range studies [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3269-3279.
- [58] HULL V, ZHANG J D, ZHOU S Q, *et al.* Space use by endangered giant pandas [J]. Journal of Mammalogy, 2015, 96(1): 230-236.
- [59] ZHANG J D, HULL V, HUANG J Y, *et al.* Activity patterns of the giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) [J]. Journal of Mammalogy, 2015, 96(6): 1116-1127.
- [60] ZHANG Z J, SHEPPARD J K, SWAISGOOD R R, *et al.* Ecological scale and seasonal heterogeneity in the spatial behaviors of giant pandas [J]. Integrative Zoology, 2014, 9(1): 46-60.
- [61] 潘文石, 吕植, 朱小健, 等. 继续生存的机会[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 73-156.  
PAN W S, LÜ Z, ZHU X J, *et al.* A chance for basting survival [M]. Beijing: Peking University Press, 2001: 73-156.
- [62] 雍严格, 王宽武, 汪铁军. 佛坪大熊猫的移动习性[J]. 兽类学报, 1994, 14(1): 9-14.  
YONG Y G, WANG K W, WANG T J. Giant panda's moving habit in Foping [J]. Acta Theriologica Sinica, 1994, 14(1): 9-14.
- [63] CONNOR T, HULL V, LIU J G. Telemetry research on elusive wildlife: A synthesis of studies on giant pandas [J]. Integrative

- Zoology, 2016, 11(4): 295–307.
- [64] 王昊. 大熊猫的保护生物学: 数量调查、栖息地利用和种群存活力分析[D]. 北京: 北京大学, 2001.  
WANG H. Panda conservation biology: Population surveys, habitat use, and population viability analysis [D]. Beijing: Peking University, 2001.
- [65] HUANG J, LI Y Z, DU L M, *et al.* Genome-wide survey and analysis of microsatellites in giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*), with a focus on the applications of a novel microsatellite marker system[J]. BMC Genomics, 2015, 16(1): 61.
- [66] 乔麦菊, 冉江洪, 张和民. 微卫星标记在大熊猫研究中的应用进展[J]. 兽类学报, 2019, 39(1): 103–110.  
QIAO M J, RAN J H, ZHANG H M. The application of microsatellite markers in giant panda research [J]. Acta Theriologica Sinica, 2019, 39(1): 103–110.
- [67] 陈曦, 杨水云, 孙飞龙. 大熊猫粪便DNA纯化及其PCR检测[J]. 经济动物学报, 2003, 7(1): 32–34.  
CHEN X, YANG S Y, SUN F L. Giant panda fecal DNA purification techniques in PCR reaction [J]. Journal of Economic Animal, 2003, 7(1): 32–34.
- [68] 周莎, 彭桦, 刘健, 等. 通过粪便确定大熊猫性别的方法研究[J]. 四川林业科技, 2016, 37(6): 82–85.  
ZHOU S, PENG H, LIU J, *et al.* A method of sex-determination tests of giant pandas [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2016, 37(6): 82–85.
- [69] 单磊, 胡义波, 魏辅文. 粪便DNA分析技术在分子生态学研究中的机遇与挑战[J]. 兽类学报, 2018, 38(3): 235–246.  
SHAN L, HU Y B, WEI F W. Opportunities and challenges of fecal DNA technology in molecular ecology researches [J]. Acta Theriologica Sinica, 2018, 38(3): 235–246.
- [70] 魏辅文, 饶刚, 李明, 等. 分子粪便学及其应用: 可靠性、局限性和展望[J]. 兽类学报, 2001, 21(2): 143–152; 160.  
WEI F W, RAO G, LI M, *et al.* Molecular scatology and its application: Reliability, limitation and prospect [J]. Acta Theriologica Sinica, 2001, 21(2): 143–152; 160.
- [71] REED J Z, TOLLIT D J, THOMPSON P M, *et al.* Molecular scatology: The use of molecular genetic analysis to assign species, sex and individual identity to seal faeces [J]. Molecular Ecology, 1997, 6(3): 225–234.
- [72] 孙波, 鲍毅新, 赵庆洋, 等. 微卫星位点获取方法的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2130–2137.  
SUN B, BAO Y X, ZHAO Q Y, *et al.* Methods for obtaining microsatellite loci: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(10): 2130–2137.
- [73] 张亚平, 王文, 宿兵, 等. 大熊猫微卫星DNA的筛选及其应用[J]. 动物学研究, 1995, 16(4): 301–306.  
ZHANG Y P, WANG W, SU B, *et al.* Microsatellite DNAs and kinship identification of giant panda [J]. Zoological Research, 1995, 16(4): 301–306.
- [74] 《中国高等植物彩色图鉴》编委会. 中国高等植物彩色图鉴: 第2卷: 蕨类植物-裸子植物[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
Editorial committee of *Higher Plants of China in Colour*. Higher plants of China in colour: Vol. II : Pteridophytes-Gymnosperms [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [75] 刘少英, 吴毅, 李晟. 中国兽类图鉴[M]. 2版. 福州: 海峡书局, 2020.  
LIU S Y, WU Y, LI S. Handbook of the mammals of China [M]. 2nd ed. Fuzhou: Straits Publishing House, 2020.
- [76] 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(6): 685–695.  
LI S, WANG D J, XIAO Z S, *et al.* Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: Review and outlook [J]. Biodiversity Science, 2014, 22(6): 685–695.
- [77] CARAVAGGI A, BANKS P B, BURTON A C, *et al.* A review of camera trapping for conservation behaviour research [J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2017, 3(3): 109–122.
- [78] MEEK P, FLEMING P. Introduction [M]//MEEK P, FLEMING P. Camera trapping: Wildlife management and research. Melbourne: CSIRO Publishing, 2014: X–XII.
- [79] SUI H G, WEI T Y, WANG J D, *et al.* Automatic video detection for golden monkeys in Shennongjia National Park, China [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023, XLVIII-1/W2–2023: 1803–1808.
- [80] ALIBHAI S K, JEWELL Z C, LAW P R. A footprint technique to identify white rhino *Ceratotherium simum* at individual and species levels [J]. Endangered Species Research, 2008, 4: 205–218.
- [81] GU J Y, ALIBHAI S K, JEWELL Z C, *et al.* Sex determination of Amur tigers (*Panthera tigris altaica*) from footprints in snow [J]. Wildlife Society Bulletin, 2014, 38(3): 495–502.
- [82] JEWELL Z C, ALIBHAI S K, LAW P R. Censusing and monitoring black rhino (*Diceros bicornis*) using an objective spoor (footprint) identification technique [J]. Journal of Zoology, 2001, 254(1): 1–16.
- [83] RASMUSSEN J H, STOWELL D, BRIEFER E F. Sound evidence for biodiversity monitoring [J]. Science, 2024, 385(6705): 138–140.
- [84] WILKINS M R, SEDDON N, SAFRAN R J. Evolutionary divergence in acoustic signals: Causes and consequences [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2013, 28(3): 156–166.
- [85] SUGAI L S M, SILVA T S F, RIBEIRO J W, Jr, *et al.* Terrestrial passive acoustic monitoring: Review and perspectives [J]. BioScience, 2019, 69(1): 15–25.
- [86] 肖治术. 被动声学技术在生物多样性监测与研究中的应用 [J]. 生物多样性, 2024, 32(10): 4–8.  
XIAO Z S. Application of passive acoustic methods in biodiversity monitoring and research [J]. Biodiversity Science, 2024, 32(10): 4–8.
- [87] PIJANOWSKI B C, VILLANUEVA-RIVERA L J, DUMYAHN

- S L, *et al.* Soundscape ecology: The science of sound in the landscape[J]. *BioScience*, 2011, 61(3): 203-216.
- [88] PETERS G. A note on the vocal behaviour of the giant panda, *Ailuropoda melanoleuca* (David, 1869)[J]. *Zeitschrift für Säugetierkunde*, 1982, 47(4): 236-246.
- [89] 周小平, 王鹏彦, 张和民, 等. 圈养大熊猫行为研究及其方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2005: 10-11.
- ZHOU X P, WANG P Y, ZHANG H M, *et al.* Research on the behavior of captive giant pandas and its methods[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology Press, 2005: 10-11.
- [90] CHARLTON B D, MARTIN-WINTLE M S, OWEN M A, *et al.* Vocal behaviour predicts mating success in giant pandas [J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(10): 181323.
- [91] CHARLTON B D, ZHANG Z H, SNYDER R J. Vocal cues to identity and relatedness in giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 126(5): 2721-2732.
- [92] CHARLTON B D, ZHANG Z H, SNYDER R J. The information content of giant panda, *Ailuropoda melanoleuca*, bleats: Acoustic cues to sex, age and size [J]. *Animal Behaviour*, 2009, 78(4): 893-898.
- [93] YAN W R, TANG M L, CHEN Z Y, *et al.* Automatically predicting giant panda mating success based on acoustic features [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01301.
- [94] 王承东, 杨波, 黄杰, 等. 大熊猫粪便野外暴露时间对微生物实验的影响[J]. *四川动物*, 2016, 35(4): 481-487.
- WANG C D, YANG B, HUANG J, *et al.* Effect of exposure time of *Ailuropoda melanoleuca* feces on microsatellites analysis [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2016, 35(4): 481-487.
- [95] 吴宏, 于黎. 揭示棕色大熊猫毛色变异的遗传基础[J]. *中国科学: 生命科学*, 2024, 54(12): 2479-2481.
- WU H, YU L. To reveal the genetic basis of coat color variation of brown giant panda [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2024, 54(12): 2479-2481.
- [96] 钟震宇. 从白色大熊猫看白化动物[J]. *科学大观园*, 2023(12): 70-71.
- ZHONG Z Y. From white giant pandas to albinistic animals [J]. *Grand Garden of Science*, 2023(12): 70-71.
- [97] 蒋辉, 古晓东, 黄雁楠, 等. 四川与秦岭野生大熊猫在形态和生态习性上的差异[J]. *西华师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(1): 12-18.
- JIANG H, GU X D, HUANG Y N, *et al.* Difference in morphology and ecological traits of wild giant pandas in the Qinling Mountains and Sichuan [J]. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*, 2012, 33(1): 12-18.
- [98] WAN Q H, WU H, FANG S G. A new subspecies of giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) from Shaanxi, China [J]. *Journal of Mammalogy*, 2005, 86(2): 397-402.
- [99] NIE Y G, SPEAKMAN J R, WU Q, *et al.* Exceptionally low daily energy expenditure in the bamboo-eating giant panda [J]. *Science*, 2015, 349(6244): 171-174.