

中华穿山甲保护生态学研究进展

华彦* 高海洋 王凯 窦红亮 李珺 郭策 孙松
安富宇 唐琳 李永政 张治东 杨文山

(广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东省林业科学研究院, 广州 510520)

摘要: 中华穿山甲 (*Manis pentadactyla*) 为国家一级重点保护野生动物。由于人为干扰、栖息地丧失和气候变化等因素, 中华穿山甲野外种群数量急剧下降, 被列为极度濒危物种。我国除台湾地区外, 中华穿山甲的分布范围已大幅缩减, 其适宜生境受植被、人类干扰、气候、地形地貌等多种因素影响。中华穿山甲营穴居, 夜行性, 家域较小, 主要以白蚁和蚂蚁为食, 通过挖掘而改变土壤的垂直结构, 增加森林生境的异质性, 为共栖物种提供了重要的洞穴资源, 在森林中发挥了“生态系统工程师”的重要角色。人工繁育是就地保护的重要补充, 中华穿山甲的救护和人工繁育面临诸多挑战, 主要表现为救护成活率低, 易患病, 人工饲料不适合, 精子品质差和后代个体存活率较低等。目前, 中华穿山甲面临的主要威胁包括栖息地丧失、极小种群灭绝危机和种群扩散受限, 其保护策略包括加强法律执行、科学研究、栖息地保护、人工繁育、公众教育和国际合作, 通过这些措施, 中华穿山甲的保护前景能够得到改善, 种群规模有望逐步恢复。

关键词: 中华穿山甲; 种群分布; 生态系统工程师; 人工繁育; 保护策略

中图分类号: Q958.1

文献标识码: A

文章编号: 1000–1050 (2025) 05–0577–16

Advances in conservation ecology of Chinese pangolins

HUA Yan*, GAO Haiyang, WANG Kai, DOU Hongliang, LI Jun, GUO Ce, SUN Song, AN Fuyu, TANG Lin, LI Yongzheng, ZHANG Zhidong, YANG Wenshan

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract: The Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*), a Class I protected species in China, faces critical endangerment due to anthropogenic pressures, habitat degradation, and climate change. Except for Taiwan, the distribution range of Chinese pangolins in China has significantly decreased. The Chinese pangolin's suitable habitats are shaped by an intricate interplay of factors including vegetation, human activity, climate, and topography. Chinese pangolins are an enigmatic, nocturnal species and possess modest home ranges and subsist primarily on a diet of termites and ants. Their burrowing behavior alters soil structure, enhances forest habitat heterogeneity, and provides additional resources for sympatric species, making them important ecosystem engineers in forest ecosystems. While ex-situ conservation through artificial breeding serves as a crucial complement to in-situ efforts, it presents critical challenges, including low survival rates of rescued individuals, enhanced disease susceptibility, difficulties in formulating appropriate artificial diets, poor sperm quality, and low offspring viability. The primary threats to Chinese pangolins encompass poaching, habitat fragmentation and loss, limited genetic dispersal, and the risk of extinction due to critically small populations. To address these multifaceted challenges, comprehensive conservation strategies need to be developed meticulously, such as bolstering law enforcement, advancing scientific research, safeguarding habitats, refining artificial breeding techniques, enhancing public awareness and education, and fostering international collaboration. Through the concerted implementation of these conservation measures, it is anticipated that the conservation scenario for Chinese pangolins will improve significantly, potentially leading to a gradual recovery of its population size.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1301500); 广东省林业科技创新项目 (2023KJCX023)

作者简介: 华彦 (1979–), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事濒危野生动物保护与管理研究。

收稿日期: 2024–07–23; **接受日期:** 2024–12–31

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: wildlife530@163.com

Key words: *Manis pentadactyla*; Population and distribution; Ecosystem engineer; Artificial breeding; Conservation strategy

中华穿山甲 (*Manis pentadactyla*) 属哺乳纲 (Mammalia) 鳞甲目 (Pholidota) 鲛鲤科 (Manidae), 是哺乳动物中一种体被鳞甲的物种。中华穿山甲曾经广泛分布于我国长江以南以及周边国家, 其挖掘洞穴并捕食白蚁。通过捕食白蚁, 穿山甲可以遏制白蚁泛滥; 捕食白蚁所挖掘的洞穴不但是生境异质性的重要组成, 也为其他动物提供庇护所、热避难所和食物等资源 (吴诗宝等, 2023; Sun *et al.*, 2024)。近几十年来, 由于人为干扰、气候变化和栖息地丧失等因素的影响, 中华穿山甲的生存受到严重威胁, 野外种群数量急剧下降, 在很多历史分布区已经绝迹, 被世界自然保护联盟 (IUCN) 列为极度濒危物种 (Challender *et al.*, 2019)。2017年, 中华穿山甲被 CITES 列为附录 I, 禁止国际贸易; 2021年, 国家林业和草原局、农业农村部将其列为国家一级重点保护野生动物。

在野外种群和栖息地就地保护实践中, 由于中华穿山甲营穴居, 夜行性, 行踪隐蔽, 野外种群调查监测较为困难, 种群生态学数据缺乏, 因此较难实现对野外种群的动态评估和制定高效的保护策略 (Zhang *et al.*, 2021)。而对于人工圈养种群, 中华穿山甲食性特化, 应激反应大, 在圈养环境中免疫力低, 人工饲养困难重重, 同时中华穿山甲的迁地保护在环境适应、营养与饲养、疾病防控、人工繁育和野化放归等方面还存在技术瓶颈, 并且中华穿山甲致濒因素复杂, 使得保护管理措施难以在短时间内奏效。因此, 迫切需要梳理出中华穿山甲保护存在的问题, 以及为未来的保护管理提供方向。

本文概述了中华穿山甲在野外种群及其栖息地保护、救护与人工繁育等生物学领域的最新研究进展, 分析了中华穿山甲保护面临的主要挑战及当前和未来应采取的主要保护措施, 旨在通过梳理中华穿山甲保护生态学的研究进展, 剖析保护管理经验, 为开展科学的中华穿山甲野外种群监测、栖息地恢复以及通过迁地保护促进野外种群复壮等保护工作提供科学参考。

1 中华穿山甲形态学特征

1.1 中华穿山甲外部形态特征

中华穿山甲进化出了一套非常独特的形态特征, 体被鳞甲、无齿, 体呈流线型, 眼部具有深色虹膜, 眼睑发达等, 这是物种识别与鉴定的基础。中华穿山甲尾长不足体长的一半 (0.42), 明显短于其他 7 种穿山甲 (Heath and Vanderlip, 1988)。吴诗宝等 (2004a) 对 43 只中华穿山甲进行形态体征测量, 发现雄性中华穿山甲的体质量超过雌性 30%, 中华穿山甲后足中爪长与前足中爪长之比不超过 1/2。中华穿山甲耳郭突出, 外缘尺寸可达 20 ~ 30 mm, 是所有穿山甲中耳郭最大的种类。此外, 中华穿山甲的肛门处具有一横向长圆形凹状物, 且肛门腺分泌物具有特殊气味 (Heath and Vanderlip, 1988)。中华穿山甲头骨细长, 无齿, 但在犬齿位置有一骨质突起, 听泡长, 吻端发达, 颧弓纤细且完整, 而其他种类穿山甲颧弓均不完整 (Emry, 2004; 吴诗宝等, 2004a)。Gaudin 等 (2006) 发现中华穿山甲的颅后骨骼呈现高度的特异性, 具有裂隙的爪状指骨。Ferreira-Cardoso 等 (2020) 通过几何形态测量学方法评估了穿山甲颅骨形状的变异和穿山甲的分类与进化关系的影响, 发现卵圆孔位于外耳骨前缘水平的位置是中华穿山甲和印度穿山甲 (*Manis crassicaudata*) 的同源性特征。这些外部形态特征是鉴别中华穿山甲的重要依据, 可以作为稳定的遗传性状为物种分类提供可靠的科学鉴定依据 (胡诗佳等, 2010)。

1.2 中华穿山甲鳞片形态特征

中华穿山甲鳞片坚硬耐磨 (崔相旭等, 1990), 鳞片上具有扇形分布的纵向棱纹突起 (马云海等, 2008), 并终生覆盖在其头背部、四肢外侧和尾背腹部, 颜色呈黑色、深棕色或深灰色。中华穿山甲鳞片是其重要的防卫器官。鳞片基部两侧簇生白色或淡棕色的刚毛, 颈部、腹中部裸露的皮肤上附着稀疏的白色毛发。全身总鳞片数约 548 ~ 623 枚, 尾侧缘鳞片数 15 ~ 19 枚, 是中华穿山甲主要分类特征之一, 单只个体鳞片干质量平均值约为 573.47 g (Zhou *et al.*, 2012)。郭策等 (2022) 研究发现, 中华穿山甲鳞片形态沿着排列方向逐渐

移行渐变, 并有左右对称的趋势, 越靠近躯干部背中列的鳞片形态越一致, 越靠近腹侧边缘部位的鳞片形态变化越大。中华穿山甲尾腹部前端鳞片呈“凸”字排列, 尾腹部鳞片颜色与尾背部鳞片颜色近乎一致。中华穿山甲的前肢最后一纵列鳞片未发生逆向生长, 与前一纵列形成“人”字状拱起的鳞片, 是中华穿山甲区别其他穿山甲的重要鉴别特征(郭策, 2021)。

2 中华穿山甲的野外种群监测和生境质量评估

2.1 中华穿山甲的地理分布格局和生境特征

中华穿山甲主要分布在中国南部, 尼泊尔, 不丹的南部, 印度的北部和东北部, 孟加拉国的东北、西北和东南部, 缅甸的北部和西部, 老挝的北部和安南山脉地区, 越南的北部及泰国的西北部地区(Challender *et al.*, 2019)。在我国, 共有3个亚种, 其中南亚种分布于重庆、贵州、四川、西藏(藏南地区)、云南、河南、湖北、湖南、安徽、福建、江苏、江西、上海、浙江、广东、广西、香港; 海南亚种分布于海南; 指名亚种分布于台湾(魏辅文, 2022; Cen *et al.*, 2023)。广东、福建、江西、浙江、安徽、海南6个省的分布点密度相对较高; 云南、西藏、贵州、广西、湖南等, 仅有零星种群分布, 分布点密度较低; 在台湾, 该物种主要分布于台湾岛的中央山脉周边、西部丘陵、桃园高地、东海岸山脉、大屯火山群、台北盆地、埔里盆地和屏東平原(Chao, 1989; Chao *et al.*, 2005)。除台湾的中华穿山甲种群已经较为稳定外, 我国其他地区的中华穿山甲种群由于受到过度人为干扰, 在部分历史分布区已经消失(Challender *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2022), 由于缺乏准确调查数据的支撑, 尚不完全清楚现存中华穿山甲在我国的准确分布范围和种群规模。近年来, 广东省先后在肇庆、韶关、河源、潮州、梅州、惠州等地使用红外相机监测记录到多次的中华穿山甲影像, 可能是我国仅有的几个密集分布的省份之一。

中华穿山甲的生境利用类型十分广泛, 在原生和次生的森林里均能栖息(Chao, 1989; Gurung, 1996)。其分布记录最高海拔达3 000 m(尼泊尔), 在较低的海拔区域也有分布(中国香港)。除海拔外, 中华穿山甲的生境受多种生物和非生物因素的影响, 并在不同的研究尺度表现迥异。在全球

尺度上, Xian 等(2022)利用全球生物多样性数据库(GBIF, <https://www.gbif.org>)对中华穿山甲的生境特征研究表明, 植被因素归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和等温性是最主要的影响因素, 决定了中华穿山甲的空间分布特征。而在区域尺度, 塔旗等(2021)基于我国10年的中华穿山甲的救护记录, 利用最大熵模型(MaxEnt)与环境因子进行拟合, 结果表明最冷季降雨量、人口密度、年降雨量、坡度、坡向、海拔6个环境变量与中华穿山甲的分布紧密相关, 适宜生境特征为最冷季降雨量141.22~439.46 mm, 年降雨量1 471.67~2 386.56 mm, 人口密度小于390人/km²和海拔小于316.98 m; Zhang 等(2024)对我国中华穿山甲的栖息地进行了预测, 结果表明中华穿山甲生境主要受食物资源丰度和气候的影响。在局域尺度上(广东省)的研究表明, 中华穿山甲的潜在分布格局较广, 主要受年均温、最暖月最高温和人类干扰的影响, 中华穿山甲有狭窄的温度适宜性区间, 并随着极端高温的增长生境适宜性降低, 更偏好分布在自然保护区内部或距离保护区较近的区域以规避人类干扰(Gao *et al.*, 2024)。

2.2 中华穿山甲野外种群数量评估及变化趋势

大多数研究表明, 由于过度捕猎, 中华穿山甲在现有分布范围的一些地区已经消失, 并且种群数量在其大部分分布范围内急剧下降(Nash *et al.*, 2016; Trageser *et al.*, 2017)。我国是中华穿山甲最主要的分布区, 在20世纪60年代至80年代, 每年捕捉和消费使用穿山甲高达16万只, 导致该物种在90年代几乎商业性灭绝, 吴诗宝等(2002, 2004b)估计在20世纪60年代至90年代, 该物种的种群数量减少了88%~94%, 我国的野生种群下降至5万只至10万只。2008年, 国家林业和草原局估计全国的中华穿山甲种群约为6.4万只, 张立等(2010)估计其种群约在2.51万只至4.95万只之间。国家林业和草原局于2019年启动了中华穿山甲资源调查, 结果表明中华穿山甲在贵州、河南和西藏暂未发现中华穿山甲野外种群, 而在广东、江西、浙江、福建等省份仍有繁殖种群, 但具体的种群数量还需要进一步深入调查。据估计, 我国内陆省份中华穿山甲的野外种群数量可能不足5万只(吴诗宝等, 2023)。我国台湾的中华穿山甲

(指名亚种)在台湾南部估计密度为 12~13 只/km², 台湾的总种群估计在 1.5 万只左右 (Pei, 2010)。

关于中华穿山甲种群调查的方法极少, 主要原因可能是该物种独居且呈夜行性, 加之其野外种群密度很低, 很难被传统监测方法观察到。在调查方法上, 目前已开发地方技术标准《中华穿山甲野外种群数量监测技术规程》(DB44/T 2400-2022), 该标准详细描述了如何调查并较准确地评估中华穿山甲的野外种群数量。该调查方法能够通过洞穴的数量评估中华穿山甲的种群数量, 已经在广东省的局部地区 (包括南岭国家级自然保护区、惠东乌禽嶂林区、韶关天井山林区、河源和平县林区、紫金莲花山林区、潮州凤凰山林区、深圳内伶仃岛和肇庆烂柯山林区) 进行了实践, 并实现了对中华穿山甲数量的较准确评估。

3 中华穿山甲的分子系统地理学与保护遗传学研究

3.1 种群遗传结构

基于不同来源地的样本, Hu 等 (2020)、Wang 等 (2022) 先后初步揭示了中华穿山甲不同地理区域的遗传谱系, 样本覆盖中国华南地区与中缅边境。近期, Wei 等 (2024) 使用覆盖主要分布区的群体样本 ($n = 94$) 在大地理尺度进一步解析了中华穿山甲的种群遗传结构, 其结果表明中华穿山甲显著分化为 3 个种群: MPA、MPB 和 MPC, MPA 与 MPB 以青藏高原南部的横断山脉为界, 横断山脉以西为 MPA 种群, 以东为 MPB 种群, 包括台湾、海南、云南、广东等我国南部地区; MPB 种群与 MPC 种群的地理分界线为亚热带与热带分界区, MPC 种群分布于包括老挝和越南在内的中南半岛东部; MPB 种群有两个亚群 (MPB1、MPB2) 分布于云南等我国南部地区 (Wei *et al.*, 2024)。

3.2 演化历史与遗传多样性评估

中华穿山甲在约 20 万年前发生了种群分化, 这可能源于更新世倒数第二个冰期 (penultimate glaciation, PG) 的气候波动, 且群体大小和适宜栖息地面积在末次盛冰期 (last glacial maximum, LGM) 出现显著下降 (Wei *et al.*, 2022)。并且, 发现群体大小和适宜栖息地面积同样在 LGM 出现显著下降。结合遗传多样性、近交水平和演化潜力评估发现, 受到横断山脉高山阻隔的 MPA 是灭绝风险最高的种群; MPB2 与 MPC 同样面临较高的灭绝

风险, 源于其有效种群在近 50 年来 (1960s—2000s) 骤减且与人类活动相关, 暗示这两个种群受到了较多的人为干扰, 可优先通过就地保护遏制其种群进一步下降; MPB1 的遗传多样性最高, 近交水平和遗传负荷最低, 有效种群数量最大, 且栖息地生态环境相对稳定 (Wei *et al.*, 2024)。上述研究揭示了中华穿山甲的遗传保护单元、群体演化历史, 并为该物种的保护管理提供了重要的理论支持。

3.3 适应性演化

作为高度特化的哺乳动物类群, 近年来少数研究关注到了穿山甲的适应性演化。Choo 等 (2016) 使用中华穿山甲与马来穿山甲的基因组数据, 通过与近缘物种的比较分析, 发现嗅觉受体 (olfactory receptor, OR) 基因家族在穿山甲进化支发生了显著扩张; 与牙齿发育 (*ENAM*、*AMBN*、*AMELX*)、视觉 (*BFSP2*、*GUCA1C*)、皮肤和粘膜免疫 (*IFNE*) 相关的基因在穿山甲基因组中发生了假基因化; 在穿山甲进化支检测到与免疫和炎症、能量储存和代谢、肌肉和神经系统、鳞片发育相关的适应性进化信号; Cao 等 (2021) 与 Pinto 等 (2023) 揭示了与穿山甲鳞甲表型相关的基因组特征, 包括皮脂腺相关基因 (*Awat1/2*、*Dgat2l6* 等) 的假基因化、鳞甲皮肤生成相关基因 (*HOX* 基因家族、*FREM2*、*CHST8* 等) 受到了选择压力; Yan 等 (2023) 发现, 穿山甲鳞甲的形成可能与高甘氨酸-酪氨酸角蛋白 (high glycine-tyrosine keratin-associated proteins, HGT-KRTAPs) 的大量复制相关; 同时, 利于胃角化上皮结构形成的表皮分化复合体 (epidermal differentiation complex, DEC) 基因的变异与丢失可能是穿山甲适应食蚁习性的关键。目前, 穿山甲特征的适应性演化研究仍然有限, 更多深层揭示其独特表型演化机制的研究仍然是缺少且必要的。

4 中华穿山甲的行为生态学研究

4.1 食物组成和营养需求

中华穿山甲食性高度特化, 以蚂蚁和白蚁为主要食物, 偶尔也捕食甲虫等其他昆虫。早期研究者通过在我国广东省的长期野外调查发现, 中华穿山甲主要取食 5 种蚂蚁和 6 种白蚁, 其中台湾乳白蚁 (*Coptotermes formosanus*)、双齿多刺蚁 (*Polyrhachis dives*) 和黄翅大白蚁 (*Macrotermes bar-*

neyi) 是中华穿山甲最偏好的食物, 其关键食物在该区域很可能是台湾乳白蚁和黄翅大白蚁 (吴诗宝等, 2005)。而在我国台湾南部地区, 台湾乳白蚁和黄胸散白蚁 (*Reticulitermes flaviceps*) 是中华穿山甲的主要食物种类 (Li *et al.*, 2011)。在我国广东省惠东县野外收集的一份粪便样本中发现中华穿山甲的猎物主要为白蚁科土白蚁属 (*Odontotermes*), 蚁科盲切叶蚁属 (*Carebara*)、大头蚁属 (*Pheidole*) 和捷蚁属 (*Anopolepis*), 以及步甲科婪步甲属 (*Harpalus*) 的物种 (Mahmood *et al.*, 2021)。我国香港地区根据救护后死亡的中华穿山甲幼体肠道内容物进行分析表明, 3 种半树栖蚂蚁: 尼科巴弓背蚁 (*Camponotus nicobarensis*)、暴多刺蚁 (*Polyrhachis tyrannica*) 和双突柄举腹蚁 (*Crematogaster dohrni*) 在肠道内容物中最丰富。在尼泊尔西南部, 对 10 份中华穿山甲粪便鉴定分析表明, 史氏盘腹蚁 (*Aphaenogaster symthiesii*)、弓背蚁属 (*Camponotus*)、小家蚁属 (*Monomorium*) 和大头蚁属的蚂蚁是中华穿山甲的主要食物来源 (Tamang *et al.*, 2022)。随着分子生态学技术的快速发展, 基于高通量测序和 DNA 宏条形码技术, 本团队进一步分析了中华穿山甲的食物组成及其季节性变化, 发现中华穿山甲的食物以白蚁类与蚂蚁类为主, 由 14 目 17 科 17 属 18 种组成, 还有一些蜚蠊目 (*Blattaria*) 昆虫 (马梦杰等, 2024)。并且, 中华穿山甲食物组成在干、湿季节间存在显著差异, 土白蚁属为中华穿山甲干季的主要食物, 盲切叶蚁属与大头蚁属为中华穿山甲在湿季的主要食物来源 (马梦杰等, 2024)。

蛋白质是中华穿山甲的主要营养需求。柯亚永等 (1999) 测定了广东地区中华穿山甲采食的红蚁 (*Ietramorium bicarinatum*)、广布弓背蚁 (*Camponotus jamponicus*) 和家白蚁 (*Coptotermes formosamus*) 的主要营养成分, 得出 3 种蚁类粗蛋白含量均超过干重的 50%, 平均为 50.65%。吴诗宝等 (2005) 对中华穿山甲主食的黑翅土白蚁 (*Odontotermes formosanus*)、小红蚁 (*Myrmica rubra*) 和黑棘蚁 (*Polyrhachis dives*) 的营养成分进行测定, 粗蛋白平均含量达 56.15%。李旭等 (2010) 对西双版纳地区穿山甲取食的邻臭蚁 (*Dolichoderus affinis*) 中的粗蛋白含量进行测定, 其蛋白质含量可达 66.86%。Xu 等 (2022) 对中华穿山甲取食的双齿多刺蚁的蚁

巢进行分析, 蚁群和成蚁均含有较高浓度的粗蛋白, 分别为 62.97% 和 64.68%。基于野外食物中的蛋白含量, 分析不同粗蛋白质水平对成年圈养穿山甲的体质量、采食量和血液生化等指标的影响, 结果表明成年中华穿山甲的适宜粗蛋白质水平理论值大约为 38% (贺慧冰等, 未发表数据)。

除蛋白质外, 中华穿山甲对脂肪和糖类也有一定需求。柯亚永等 (1999) 测定了红蚁、广布弓背蚁和家白蚁的营养成分, 得出 3 种蚁类粗脂肪含量平均为 25.1%, 总糖含量平均为 7.45%; 吴诗宝等 (2005) 对黑翅土白蚁、小红蚁和黑棘蚁的营养成分进行测定, 粗脂肪平均含量达到 25.1%; 李旭等 (2010) 对邻臭蚁的营养成分进行测定, 粗脂肪含量在 20% 左右。Xu 等 (2022) 对双齿多刺蚁蚁巢进行分析, 蚁群和成蚁均含有粗脂肪 (10.12% 和 9.91%) 和甲酸 (2.06% 和 3.07%)。此外, 蚂蚁和白蚁会分泌不同成分的防御性化学物质, 其中蚂蚁分泌物中富含多肽、甲酸和生物碱等有毒物质, 白蚁分泌的化学防御液包括酸酯衍生化合物和萜类物质等 (Touchard *et al.*, 2014)。上述研究表明中华穿山甲可能更偏好高蛋白、高脂肪和低糖类的食物。

4.2 家域和活动节律

中华穿山甲为穴居、夜行性动物, 通过掘洞进行觅食、隐藏休息 (包括分娩) 和躲避捕食者, 白天大部分的时间在洞中休息, 夜晚会离开洞穴进行觅食及活动, 19:00—22:00 活动较频繁 (吴诗宝等, 2004b; Bao *et al.*, 2013)。特殊的生活习性致使野外观察和追踪极其困难, 通常需要多种方法联合使用才能够成功监测。我国台湾的学者最早通过无线电追踪和红外相机相结合的方法对中华穿山甲进行野外观察, 通过追踪观察, 台湾北部的福山地区雄性中华穿山甲的家域范围约为 69.9 hm^2 (基于 12 个月的跟踪数据, $n = 1$), 雌性家域面积约为 24.4 hm^2 (基于 6 个月的跟踪数据, $n = 6$); 在台湾东南部的台东, 利用 100% 最小凸多边形 (minimum convex polygon, MCP) 推算单个雄性中华穿山甲的家域范围约为 96 hm^2 , 90% 固定核密度 (fixed kernel density, FKD) 估算为 66.60 hm^2 , 6 只雌性的平均居住范围为 14.3 ~ 30.3 hm^2 (MCP) 和 15.9 ~ 19.6 hm^2 (FKD) (Lin, 2011; Sun *et al.*, 2019)。

在哺乳期, 中华穿山甲频繁地将后代在不同

居住洞穴间转移, 停留时长 1 ~ 35 d 不等 (Sun *et al.*, 2019)。整合 GPS 卫星定位、甚高频 VHF 无线电遥测和红外相机监测 3 种技术, 郭瑞萍等 (2024) 在广东省河源市成功持续追踪了 1 只雌性中华穿山甲, 其活动区和核心活动区面积略小于台湾地区的监测结果, 固定家域面积为 23.99 hm², 核心活动区面积为 10.95 hm²; 活动高峰时间为 18:00 至次日 01:00, 洞外活动时间占比 4.46%; 在哺乳期, 7 个居住洞中每个洞穴平均利用 2 ~ 18 d。

4.3 穴居模式

中华穿山甲的穴居生境需求独特且呈现显著的地区差异。吴诗宝等 (2004c) 在广东省茂名市大雾岭自然保护区、惠州市罗浮山自然保护区、潮州市三饶镇和铁铺山等地对记录到的 73 个洞穴进行了生境特征量化, 表明海拔、隐蔽度、坡度、坡位和距干扰源距离的主成分贡献率依次递减, 海拔和隐蔽程度两个变量贡献率累计达到 65.54%, 是影响中华穿山甲洞穴生境选择的主要因子, 而坡度、坡位和距干扰源距离是次要因子。在深圳内伶仃岛对中华穿山甲 165 个洞穴生境特征的研究表明, 灌草丛盖度、乔木数量及海拔对内伶仃岛中华穿山甲冬季生境选择偏好有显著影响, 中华穿山甲冬季倾向于在灌草丛盖度为 20% ~ 60%, 乔木数量较少, 海拔 100 ~ 200 m 的生境栖居, 对其他环境要素则没有明显倾向 (王嘉文等, 2021)。

中华穿山甲是挖洞高手, 能在数小时内挖掘深达 3 m 的洞穴, 并在洞外形成裸露土堆, 自外而内由土堆、洞口和洞道组成, 最深可达 5.6 m。强大的挖掘能力来源于其独特的身体构造, 与偏好树栖的马来穿山甲 (*Manis javanica*) 相比, 中华穿山甲颅后肩胛骨具有宽粗的肩胛冈, 肱骨粗壮, 胸肌发达 (华彦等, 2024), 说明中华穿山甲的颅后骨骼形态可能更有利于地栖掘洞。中华穿山甲洞穴为单一入口且不分支的盲洞, 洞口狭窄, 洞道曲折, 两侧分布多个蚁巢, 洞道膨大处形成巢室, 洞穴具有保护中华穿山甲躲避敌害, 提供良好排水性能, 保持洞穴稳定微气候的功能。中华穿山甲洞穴根据其利用模式可分为居住洞与觅食洞两种, 两者在外部形态、内部结构上均存在较明显的差异。居住洞的洞穴全长、体积以及挖掘出的土堆覆盖面积均显著大于觅食洞, 并且觅食洞在更开阔的地区比较容易找到 (Lin, 2011; 孙松,

2022; 张圣, 2024)。由于单个蚁巢内的白蚁数量 (食物资源) 有限, 中华穿山甲需要频繁地挖掘洞穴, 其种群核心栖息地内觅食洞穴密度可达 110.8 个/hm² (Lin, 2011)。大量的中华穿山甲洞穴会改变地表形态及地表资源可获得性分布, 但土壤扰动对生态系统的影响研究较少 (Jones *et al.*, 1997; Sun *et al.*, 2021)。Sun 等 (2024) 对 299 个穿山甲洞穴的形态结构进行测量 (平均洞径: 14.54 cm; 平均洞深: 153.22 cm), 计算出中华穿山甲种群的土壤扰动能够创造 2.66 m³/hm² 的地下空间 [搬运土壤 (2.76 ± 1.95) t/hm²], 以及 83.1 m²/hm² 的裸露土堆。因此, 中华穿山甲通过挖掘洞穴增加了森林垂直结构的复杂性 (地下洞道) 和水平 (地表土堆) 生境的异质性。鉴于中华穿山甲历史分布范围的广泛性, Sun 等 (2024) 推断其土壤扰动是维持景观生境异质性的动力之一, 在森林物种多样性的维持中发挥了重要作用。

同时, 洞穴的长度、深度与捕食行为密切相关, 对不同季节的洞穴进行解析发现, 南方冬季的中华穿山甲洞穴 [(144 ± 73) cm] 比夏季深 (32 ± 11) cm (吴诗宝等, 2004c)。在冬季发现新挖掘的觅食洞穴较多, 且洞穴周围通常可以发现白蚁活动的痕迹, 如菌圃或者白蚁尸体 (吴诗宝等, 2004b; Lin, 2011)。

5 中华穿山甲的生态功能

5.1 食蚁特性益于维系生态平衡

中华穿山甲因其食蚁特性, 自古以来被认为是生态益兽, 例如《南州异物志》中记载: “鼬, 状如獭而白毛, 圆脑, 有牙爪。尾甚短, 能缘树木, 啖蚁而食。土人珍之。” 古代南方住房多为木质结构, 易受白蚁侵害, 因此主食白蚁的穿山甲被视为祥瑞之兽。相关学者通过量化中华穿山甲的食物组成 (白蚁种类) 及食物量, 结合捕食频率, 初步评估每只中华穿山甲能够保护 16.67 hm² 森林免遭白蚁类昆虫危害 (吴诗宝等, 2023; 马梦杰等, 2024)。因此, 当前我国江西、广西、云南等地区的白蚁危害极有可能与穿山甲种群下降、消失有关 (张燕洪等, 2024; 覃海林, 2024)。对中华穿山甲捕食白蚁而产生的级联性生态影响应得到更加精确的评估, 需考虑到中华穿山甲对不同种类白蚁觅食的偏好性、食性在季节上的波动 (夏季多采食蚂蚁而冬季偏好白蚁), 以及不同种类白蚁

在地区、林型中分布的异质性。这将为中华穿山甲保护的生态学意义提供理论支持。

5.2 中华穿山甲洞穴的庇护所作用

目前对于中华穿山甲洞穴功能的实证分析较少, 孙松 (2022) 讨论了中华穿山甲洞穴的热缓冲作用及其热避难所功能。在土壤层的隔温作用下, 洞内微气候与洞外气候形成脱耦: 穿山甲洞内日均温波动低于 0.2°C , 而洞外日均温波动可达 20°C ; 洞内季节性温度变化幅度也远小于洞外 (相差 10 倍以上), 表现出冬暖夏凉的特性 (苏超, 2011; 孙松, 2022)。超过 65 种陆生脊椎动物会利用中华穿山甲洞穴, 如灰胸竹鸡 (*Bambusicola thoracica*) 利用洞穴孵化、抚育幼鸟, 鼬獾 (*Melogale moschata*) 在洞内、外交配, 白鹇 (*Lophura nycthemera*) 及其雏鸟在新鲜土堆上进行沙浴, 豹猫 (*Prionailurus bengalensis*) 在洞口埋伏鼠类 (孙松, 2022) 等。因此, 中华穿山甲被称为“生态系统工程师”, 通过提供大量洞穴微生境资源吸引资源依赖性物种, 进而对生物多样性产生影响 (Romero *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2021)。此外, 还记录到 40 余种动物进入穿山甲洞穴的行为, 并在不利环境温度 (低温: $< 5^{\circ}\text{C}$, 高温: $> 30^{\circ}\text{C}$) 下利用穿山甲洞穴的物种数、个体数及利用时长均显著增加。因此, 中华穿山甲洞穴的热缓冲作用驱动了共栖物种对洞穴的利用, 随着全球变暖的趋势, 洞穴的热避难所功能对当地物种的生存可能发挥更关键的作用 (Riddell *et al.*, 2021; Armstrong *et al.*, 2022)。

此外, 中华穿山甲洞穴洞道狭窄坚固, 可以抵御火灾、暴风雨等侵袭, 防止中大型捕食者进入, 成为小型动物的天然庇护所 (Dawson *et al.*, 2019); 而洞道中残余的白蚁 (蚁巢被攻击后可能会在洞内重新修筑蚁巢)、土堆中的种子 (深层土壤中蕴含的植物种子, 同时隆起土堆增加了对风媒传播、动物携带种子的捕获率) 和土壤动物则为其他动物提供了新的食源 (Dundas *et al.*, 2018; Louw *et al.*, 2019)。张圣等 (2024) 通过对中华穿山甲利用的火烧迹地植物群落的恢复研究发现, 中华穿山甲洞穴生境 (土堆和洞口) 的植物多样性增长速度显著高于无洞穴区域, 说明在次生演替初期 (火烧后半年以内), 洞穴生境促进了火烧迹地先锋植物的定植。主要的原因是洞穴生境的土壤含水量和营养含

量 (有机质、碳和磷)、土壤容重、pH 值和微生物丰度更加有利植物的生长 (Sun *et al.*, 2024)。

6 中华穿山甲的人工救护

6.1 救护的原因及影响成活率的因素

救护、人工繁育和野外放归是复壮野外种群的重要方法 (An *et al.*, 2023a)。中华穿山甲被救护主要有两个原因: 一是迷失受困、受伤、体况虚弱及处于特殊时期的个体 (孕兽难产、失去母兽照顾的幼体等); 二是野生动物救护机构对查获的非法贩运的中华穿山甲进行收容救护, 通过医疗护理帮助其恢复健康并回归野外 (Wang *et al.*, 2020; Chang *et al.*, 2021)。而从非法贸易中救护的中华穿山甲由于捕捉和贩运的条件恶劣、长时间未进食与饮水、强应激反应、体温调节能力差及免疫抵抗力弱等, 健康状况通常较差 (Bell *et al.*, 2004; Wicker *et al.*, 2020)。并且多数个体被灌食玉米糊, 通过增重提高非法收入, 这种灌食方法常常会导致中华穿山甲出现腹泻、胃溃疡和消化道损伤等症状 (Challender *et al.*, 2020), 必须及时进行治疗才能存活。此外, 由于对中华穿山甲的基础生物学学习性不了解、伤病情况复杂和相关生理指标不明确等 (Chen *et al.*, 2021), 使得兽医在没有成功案例的参考下制定的救护方案不适用, 这也是影响穿山甲救护成活率的重要原因之一。

对中华穿山甲进行临床检查时, 首先要对个体的行为和运动状态、精神状态、饮食状况、呼吸状况、体表温度、皮肤触感、体表寄生虫感染情况、排遗状况以及对外界刺激的反应等进行密切观察。当个体出现指标异常时, 应优先考虑进一步的临床检查。血液生理学与生化检测可有效监测动物身体状况, 结合 X 线、B 超、CT 等影像学检查, 以及粪便、尿液、组织液或分泌物等细胞学检查与病原学鉴定, 可为兽医的诊断提供参考, 以便有效开展相应治疗措施 (Zhang *et al.*, 2021; An *et al.*, 2023b; Wang *et al.*, 2024)。

6.2 常见传染病与诊治

目前已公开报道中华穿山甲携带大量病原微生物, 包括 5 种细菌、6 种病毒、1 种原虫、3 种蜱虫、1 种螨虫及多种线虫 (表 1)。

这些病原微生物会导致中华穿山甲发生多系统感染性疾病。其中, 呼吸道疾病、消化道疾病以及外伤感染是中华穿山甲的高发疾病 (Lin *et al.*,

表1 中华穿山甲常见病原微生物
Table 1 Pathogenic microorganism of Chinese pangolin

类型 Type	病原微生物 Pathogenic microorganism	文献来源 References source
细菌 Bacteria	大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)、变形杆菌 (<i>Proteus vulgaris</i>)、荧光假单胞菌 (<i>Pseudomonas fluorescens</i>)、肺炎克雷伯菌 (<i>Klebsiella pneumoniae</i>)、费格森埃希菌 (<i>Escherichia fergusonii</i>)	Heath and Vanderlip, 1988; An <i>et al.</i> , 2023a
病毒 Viruses	犬瘟热病毒 (Canine distemper virus)、犬细小病毒 (Canine parvovirus)、东阳穿山甲病毒 (Dongyang pangolin virus)、丽水穿山甲病毒 (Lishui pangolin virus)、乳头状瘤病毒 (Novel Papilloma viruses)、内源性逆转录病毒 (Endogenous retrovirus)	Gao <i>et al.</i> , 2020; Zhang <i>et al.</i> , 2022; Nino <i>et al.</i> , 2023
原虫 Protozoan	疟原虫 (<i>Plasmodium tyrio</i>)	Perkins and Schaer, 2016
蜱虫 Tick	龟形花蜱 (<i>Amblyomma testudinarium</i>)、蓬莱血蜱 (<i>Haemaphysalis formosensis</i>)、豪猪血蜱 (<i>Haemaphysalis hystricis</i>)	Chin and Tsao, 2015; Khatri-Chhetri <i>et al.</i> , 2015
螨虫 Mite	<i>Sarcoptiform mite</i>	Khatri-Chhetri <i>et al.</i> , 2016
线虫 Nematode	钩虫属 (<i>Ancylostoma</i> spp.)、毛细线虫属 (<i>Capillaria</i> spp.)、旋线虫属 (<i>Cylicospirura</i> spp.)、类圆线虫属 (<i>Strongyloides</i> spp.)、广东重陈旋线虫 (<i>Chenospirura kwangtungensis</i>)、Fausti刺唇线虫 (<i>Dipetalonema fausti</i>)、Hamospiculatum胃线虫 (<i>Habronema hamospiculatum</i>)、美洲板口线虫 (<i>Necator americanus</i>)、Type 圆线虫、 <i>Leiperinema leiperi</i> 、 <i>Manistrongylus meyeri</i>	Chin and Tsao, 2015; Khatri-Chhetri <i>et al.</i> , 2015

2015; Que *et al.*, 2022; Ye *et al.*, 2022)。非法贩运环境差、强制灌食玉米糊等异物、收容救护后长时间的高应激水平 (Yan *et al.*, 2021)、对人工圈养环境不适应及救护人员对穿山甲营养需求和基础生物学学习性的不了解等都是直接或间接引发中华穿山甲发生上述疾病高发的重要因素 (Xu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022)。对于这些疾病的治疗, 除采取对症治疗外, 要诱导其自主进食, 同时要营养不良与体质量减轻的个体进行补饲, 避免因营养不良出现代谢紊乱, 必要时补充维生素和电解质, 以恢复电解质平衡。

中华穿山甲的救护成功率取决于救护时个体的状态、兽医的及时诊治以及动物的康复情况。尽管目前对中华穿山甲生理特征和疾病的了解有限, 但随着救护技术的不断提升, 中华穿山甲病例报告不断丰富, 能够使中华穿山甲的救护成功率得到进一步提高 (Pereira *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021; Barton *et al.*, 2022)。

7 中华穿山甲的人工繁育研究进展

7.1 人工繁育

随着野生中华穿山甲种群急剧下降, 人工繁育成为其野外种群复壮的重要途径之一。目前, 中华穿山甲的人工繁育成功率较低, 主要原因为动物交配意愿低、精子品质差、缺乏对雌甲妊娠状况的评估及对其育幼期和断奶过渡期的营养需求和饲养管理认知不足等问题 (Yang *et al.*, 2007; Chin *et al.*, 2011; Hua *et al.*, 2015)。

自1877年首次报道圈养中华穿山甲以来, 全球至少有24家动物园和5所机构尝试对中华穿山

甲进行人工饲养。然而, 大多数圈养的穿山甲个体在一年内死亡, 鲜有中华穿山甲人工繁育成功的报道 (Hua *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2016)。Wu等 (2016) 基于文献统计, 在2016年以前, 仅有5个圈养繁殖成功产下中华穿山甲幼仔的案例。1965年, 日本上野动物园在没有交配记录的情况下, 诞育1只中华穿山甲幼仔, 并养育成功; 1997年12月, 我国台北动物园首次成功产下1只雄性中华穿山甲, 名为“穿萌”; 2011年, 我国华南师范大学穿山甲人工救护与保护繁殖研究基地, 产下1只雄性幼仔 (MP86), 发现时幼仔已死亡, 但个体发育完整。

关于雌性中华穿山甲的发情、排卵方式和妊娠周期等参数并不明确。Cen等 (2010) 报道, 雌性穿山甲在交配季节有2~5个发情周期, 每个周期持续11~26 d, 直至妊娠。Arora等 (2023) 通过检测雌性血清中的雌二醇-17 β (E2) 水平推测雌性中华穿山甲具有明显的发情周期, 为每年的11月至次年3月, 且在发情期之后开始排卵。Wu等 (1998) 根据收集到的资料, 认为雌性中华穿山甲的妊娠周期为6~7个月。Yang等 (2007) 通过中国台北动物园的饲养记录以及资料收集, 认为中华穿山甲的妊娠期约为101~169 d; Chin等 (2011) 采用孕酮放射免疫测定试剂盒, 对3只怀孕和2只未怀孕的野外救助的雌性中华穿山甲的血清孕酮浓度进行了比较, 得出中华穿山甲的妊娠期为318~372 d; Sun等 (2021) 在2014年12月至2015年5月基于无线电与红外相机持续监测1只雌性中华穿山甲, 发现其妊娠期至少为150 d。

此外, Sun 等 (2021) 在 2014 年 12 月至 2015 年 5 月期间通过红外相机发现, 雌性中华穿山甲在哺乳期 (产后 4 个月左右) 与雄性发生了交配行为。1980 年 10 月, 根据广东省龙门县的野外记录, 在一个洞穴中同时观察到 4 只中华穿山甲, 其中包括 1 只成年雄性、1 只成年雌性以及 2 只体质量分别约为 1 500 g 和 250 g 的幼仔 (刘振河和徐龙辉, 1981)。基于已知的妊娠周期, 中华穿山甲很可能存在类似大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 的延迟着床现象 (Zhang *et al.*, 2009)。关于中华穿山甲的繁殖行为及对雌性妊娠状况评估的报道较为缺乏。Wang 等 (2024) 建立了注意力机制和时空相对网络模型, 并结合机器视觉技术, 实现了人工繁育穿山甲繁殖行为 (追逐、爬跨) 和日常行为的自动化识别。该识别系统可以准确观察穿山甲的繁殖行为, 通过分析繁殖行为, 能够辅助评估穿山甲繁殖期交配情况, 提高穿山甲圈养繁殖成功率。

综上, 中华穿山甲的生殖生理学领域目前仍主要依赖于观察性研究, 尚缺乏深入的生理性探索。为精准掌握其生殖周期, 亟需开展中华穿山甲系统性生理学研究, 结合现代生物技术手段, 深入解析其生殖机制, 为科学繁育与管理奠定坚实基础。

7.2 人工育幼

中华穿山甲幼仔出生时头部、四肢、爪和尾巴已发育完全, 鳞片较为柔软, 颜色呈灰白色, 靠近皮肤底部颜色较深, 呈深褐色, 鳞片之间的白色刚毛清晰可见 (Wu *et al.*, 2016)。幼仔的爪向内卷曲, 包裹在柔软的胶状膜中, 次日, 膜干燥脱落。这种机制可能有助于防止新生幼仔的爪对雌性穿山甲的子宫和阴道造成伤害 (Wu *et al.*, 2016)。幼仔的眼睛出生后就已睁开, 且运动协调性良好 (Heath and Vanderlip, 1988)。幼仔出生时体质量为 80 ~ 180 g, 体长 185 ~ 265 mm (Wu *et al.*, 2016)。雌性中华穿山甲的哺乳方式为怀抱式。中华穿山甲具乳腺一对, 位于前肢腋下, 在哺乳时, 将幼仔抱在胸前, 只露出头部, 哺乳期间略微放松身体。

人工繁育的雌性中华穿山甲可能由于营养不足或者应激反应等, 导致乳汁不足, 甚至出现弃养现象。当出现这种问题时, 需考虑进行人工育

幼, 由于穿山甲幼仔对营养需求高, 需在羊奶粉中添加乳清蛋白、植物性蛋白等以满足营养需求。中华穿山甲幼仔在 5 ~ 6 个月时断奶, 断奶时幼仔体质量为 2 ~ 3 kg (Sun *et al.*, 2021)。幼仔断奶分窝饲养的主要难题是幼仔应激、诱食方法、对人工饲料的过渡适应、胃肠道疾病防治及适宜的饲料配方。

7.3 采精方法和精子品质评估

雄甲的繁殖性能低, 已成为限制中华穿山甲繁殖成功率的关键因素。Li 等 (2024) 首次系统地对中华穿山甲精子采集、精子质量、精子形态及超微结构进行了研究, 发现电刺激采精法比较适合中华穿山甲; 中华穿山甲精液呈黄色至淡黄色, 黏稠, 有腥味, pH 值在 7.7 ~ 7.9 之间, 呈弱碱性。中华穿山甲的精子总长度为 $(67.62 \pm 0.21) \mu\text{m}$, 头长 $(10.47 \pm 0.06) \mu\text{m}$, 头宽 $(1.33 \pm 0.006) \mu\text{m}$, 尾长 $(57.16 \pm 0.20) \mu\text{m}$, 扫描电镜观察到精子头部具有杆状结构, 有明显的顶脊, 这与大多数哺乳动物不同, 与鸟类和爬行动物相似; 通过透射电镜发现中华穿山甲顶体膜为双膜结构; 根据人工圈养的繁殖记录, 将 6 只雄性中华穿山甲分为繁殖率低和繁殖率高两组; 使用计算机辅助精子分析系统、低渗肿胀法 (HOST) 和吉姆萨染色法对两组的精液品质进行评估, 评估内容包括精子存活率、活力、畸形率、质膜完整性及顶体完整率等。结果显示, 两组的精子存活率、活力及顶体完整性之间没有显著差异; 而精子平均畸形率及质膜完整性存在显著性差异。由此推测, 精子畸形率和质膜完整性可能是影响中华穿山甲繁殖率的主要原因。

8 中华穿山甲饲养管理与营养需求

8.1 日常饲养管理

适宜的饲养环境是圈养穿山甲生存的基本前提, 尽量在人工条件下营造与自然栖息地相仿的环境, 以此来减少因环境变化而产生的应激。基于中华穿山甲的生活史特征, 在建设圈养笼舍时, 可以使用天然土层作为圈舍下垫面, 柔软的地面可以保障它们擅长挖掘的自然习性并且能减少穿山甲因挖掘导致的擦伤 (Nguyen *et al.*, 2010)。使用混凝土铺设圈舍底部, 防止穿山甲逃逸 (Chalender *et al.*, 2012; Mohapatra *et al.*, 2016)。每一只成年个体配置单独的圈舍, 圈舍分成内舍与外舍

且相通,使它们能在内外舍自由活动。尽量模拟野外穿山甲洞穴中的环境与光照强度;外舍可以配备草地、假山和水池等设施,以满足自然习性,便于日后野化训练(Mohapatra *et al.*, 2016)。此外,中华穿山甲因体表覆盖鳞片,体温调节能力差,对温湿度变化极为敏感,因此适宜的圈舍温度对穿山甲健康极为重要(Bao *et al.*, 2013)。根据文献和实践经验,圈养中华穿山甲最适的环境条件为:温度 18 ~ 24 °C,湿度 70% ~ 80%,噪声应控制在 40 dB 以内(Bao *et al.*, 2013)。

8.2 人工饲料配方

中华穿山甲的天然食物(白蚁和蚂蚁等)较难获取,难以满足其需要量。因此,需要开发一些适宜的替代饲料配方以满足中华穿山甲的日粮需求。人工饲料配方除了考虑营养成分外,还需考虑人工饲料的适口性和安全性(Hua *et al.*, 2015)。学者对中华穿山甲的人工饲料进行了大量的研究,顾文仪等(1983)用蚯蚓等诱食中华穿山甲后制定了以下饲料配方:50%蚕蛹粉、5%奶粉、5%熟鸡蛋、10%干酵母,还添加了25%的土壤和5%的干槐叶粉以及多种维生素和生长素。将这些成分研磨拌匀之后添加40%~50%的水,组成混合饲料。台北动物园研发的饲料配方包括:酵母粉2.7 g、椰子粉1.4 g、蜂蛹100 g、面包虫45 g、蛋黄10 g、苹果65 g、碳酸钙粉0.9 g,加入60 g水,使用果汁机混和均匀,再加入营养辅助剂1.5 g与综合维生素滴剂5 mL混和均匀,组成调配饲料(Yang *et al.*, 2007)。燕洪美等(2022)在此配方基础上进一步优化,以台湾乳白蚁、拟黑多刺蚁、面包虫、梨、胡萝卜、蚕蛹干、椰子粉、黑水虻幼虫干、山楂、蚯蚓粉、洋葱、蜂蜜和盐为原料,配制添加不同比例白蚁的饲料配方对中华穿山甲进行消化室验,动物消化良好。根据上述研究,推荐中华穿山甲饲料配方为:35%双齿多刺蚁、18%苹果、7.5%蜂蛹、2.5%台湾乳白蚁、7.0%黑水虻幼虫干、4.5%面包虫、7.0%蟋蟀干、3.5%蚯蚓干、3.5%山楂粉、6.0%土壤、0.2%碳酸钙、0.2%蜂蜜、0.1%食盐。配方中,干物质含量约为66.0%,能值约为13.12 kJ/g,粗蛋白含量约为27.4%,粗脂肪含量约为11.5%,粗灰分含量约为7.6%。

9 中华穿山甲保护面临的挑战

9.1 盗猎压力及商业利用

为了满足国内外市场需求而产生的不可持续的捕猎和盗猎是中华穿山甲的主要致濒因素。随着国际贸易的兴起,穿山甲鳞片曾作为一种中药,肉作为一种奢侈品被贩卖。在该物种过去的两个生活史周期,巨大的消费需求使该物种的种群数量降低了80%以上,分布区域大幅度缩小,并已在局部地区灭绝(Nash *et al.*, 2016; Trageser *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2022)。在孟加拉国、印度东北部和尼泊尔等地,利润较低的本地消费已经被淘汰,主要转变为鳞片的非法国际贸易,以获得高额的经济回报(Katuwal *et al.*, 2015; Trageser *et al.*, 2017; D' Cruze *et al.*, 2018)。20世纪80年代至90年代,濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)报告的国际贸易中涉及约5万只中华穿山甲,包括尸体和活体(Wu *et al.*, 2020)。2000年实行零出口配额后,合法的国际贸易已大幅减少,而非法国际贸易仍然存在,Challender等(2015)根据查获记录估计,2000—2013年,国际走私可能涉及5万多只中华穿山甲。

近几年,我国加大了对盗猎穿山甲案件的查处力度,盗猎现象已明显减少。2020年2月24日,十三届全国人大常委会第十六次会议审议通过了《全国人民代表大会常务委员会关于全面禁止非法野生动物交易、革除滥食野生动物陋习、切实保障人民群众生命健康安全的决定》,打击了野生动物非法贸易。同年,新版的《中华人民共和国药典》将穿山甲除名。2021年,国家林业和草原局、农业农村部发布的《国家重点保护野生动物名录》将穿山甲属动物由国家二级重点保护野生动物提升至一级。2024年1月,生态环境部发布《中国生物多样性保护战略与行动计划(2023—2030年)》,从国家政策方面有力促进我国穿山甲的保护工作。

9.2 生境退化及栖息地丧失

受人类活动干扰和空间异质性的共同影响,当前中华穿山甲栖息地丧失严重,质量普遍较低,栖息地呈典型的破碎化、斑块状(塔旗等, 2021; Gao *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024)。历史上,我国南方的林区曾经历过多次大面积的砍伐,涉及大面积的中华穿山甲栖息地,难以通过自然演替恢复到原状。同时,一部分林区由于封山育林、

自然保护区的建立等, 人为活动干扰虽然减少了, 但是也导致林木过于茂密, 林相结构单一, 反而并不适宜中华穿山甲的生存 (Wu *et al.*, 2020)。而在尼泊尔等国家, 中华穿山甲的潜在适宜生境几乎全部在保护区之外, 且大多受到耕地、人类居住区和基础设施建设的侵占, 农业用地上人为活动的增加以及森林砍伐等造成的栖息地破坏影响了中华穿山甲的生存 (Sharma *et al.*, 2020; Acharya *et al.*, 2021)。种种原因导致中华穿山甲的栖息地破碎化严重, 部分生境结构成分单一或发生了显著改变, 短时间恢复难度极大。因此, 如何促进中华穿山甲的栖息地恢复将是穿山甲保护实践中的一大挑战。

9.3 极小种群的灭绝危机

由于工业化、城市化进程加速, 水电站等基础设施的建设、采矿以及农药使用等, 致使中华穿山甲栖息地破碎化严重, 且生境质量严重下降 (Sharma *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020)。目前, 中华穿山甲栖息地内普遍存在公路、小水电站及水渠等基础设施, 尤其是环山修建的水渠, 在我国广东、广西、云南、海南和福建等地的中华穿山甲栖息地内均有分布, 且数量很多。这些公路和水渠不仅将中华穿山甲栖息地切割成若干斑块, 造成栖息地破碎化, 同时也阻止了动物之间的扩散和基因交流。在我国东部和南部, 绝大部分的野生中华穿山甲种群呈现 10~30 只左右的破碎化、岛屿状小种群 (彭杰, 2020)。而在其他国家, 如孟加拉国, 情况也类似, 中华穿山甲可能已经在东南部部分地区灭绝, 仅在吉大港山区内的一些地区存在数量稀少、相互隔离的种群 (Trageser *et al.*, 2017)。碎片化的栖息地很难为中华穿山甲提供充足的栖息环境, 并且岛屿化和人类干扰阻隔了各个小种群之间的基因交流, 致使小种群灭绝风险增加。当种群个体数量下降至 10 只左右时, 在无人类干扰和捕猎的理想状态下, 该小种群会在 40 年后迎来灭绝; 人类干扰和捕猎的概率每增加 10%, 种群灭绝的时间会提前 10 年左右 (彭杰, 2020)。由于这些威胁, 尼泊尔曾经确切有中华穿山甲分布的一些区域, 现已没有穿山甲的分布 (Kaspal *et al.*, 2016)。

此外, 中华穿山甲繁殖力低下, 每年生育一胎, 每次通常只产一仔, 偶产两仔 ([https://](https://www.forestry.gov.cn/)

www.forestry.gov.cn/)。中华穿山甲形态特征决定了该物种可能不具备长距离迁移扩散的能力, 其较小的家域也证实了这一点, 成年个体 (> 7 kg) 的家域面积仅为 5.65 ~ 11.07 km² (吴诗宝等, 2004b)。因此, 分布在隔离斑块内的中华穿山甲小种群可能面临着更高的灭绝风险。

9.4 家养动物威胁

家犬作为一种特殊的人类干扰, 可以从多方面对野生动物产生影响 (Zhang *et al.*, 2024)。家犬通过不同方式直接 (捕食、攻击等) 或者间接 (病毒、寄生虫等) 影响着中华穿山甲的生存。家犬具有一定攻击能力, 是中华穿山甲的潜在捕食者之一, 在我国广东、云南、台湾等地都有家犬攻击中华穿山甲的记录 (Sun *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021)。根据台湾屏东濒危野生动物救护中心 2006—2017 年的中华穿山甲救护记录, 约有 20.4% 的中华穿山甲曾遭到家犬的攻击, 造成尾部受伤 (Sun *et al.*, 2019)。

同时, 家犬也是寄生虫病传播的宿主之一, 尤其是寄生在家犬的硬蜱属的蜱虫目 (Ixodidae), 被证实同样会寄生在中华穿山甲。在多个穿山甲救护记录中, 均发现蜱虫附着在其鳞片下 (Khatri-Chhetri *et al.*, 2015)。由于中华穿山甲免疫系统较弱, 受到蜱虫攻击后, 蜱虫携带的各种病原微生物极易引发感染, 并导致死亡 (Khatri-Chhetri *et al.*, 2016)。此外, 犬细小病毒对于中华穿山甲存在较高的致死率, 而家犬作为犬细小病毒的主要携带者, 可通过尿液、粪便、呕吐物、唾液等多种途径向中华穿山甲传播, 野生中华穿山甲一旦感染, 且无法得到有效救治, 死亡率极高 (Chang *et al.*, 2021)。患病中华穿山甲在感染康复后会终身携带病毒, 可能在繁殖交配过程中传播, 这对于野生穿山甲种群而言是一个较大的威胁。

10 中华穿山甲保护的主要对策

目前, 中华穿山甲研究与保护面临的困境主要包括栖息地丧失与破碎化、非法猎捕与贸易、生态习性了解不足、公众保护意识较低以及数据收集与管理不足。为应对这些挑战, 新技术的应用能够增强中华穿山甲保护措施的科学性和有效性。如利用遥感与 GIS 技术监测栖息地变化, 结合 DNA 条形码技术打击非法贸易, 运用卫星跟踪和声学监测技术研究穿山甲的行为习性, 利用社交

媒体和VR/AR技术提高公众对野生动物保护的参与度,最后通过大数据和移动应用建立系统化的数据管理平台。

中华穿山甲的保护涉及政策、科研、公众意识提升以及国际合作等多个方面。一是加强现有保护政策与法规的执行力度。我国政府已经将中华穿山甲的保护级别提升至国家一级,这说明国家对穿山甲保护的重视,但盗猎和偷猎事件仍时有发生,需要野生动物保护管理部门严格贯彻相关法律法规,普及相关法律知识,使民众知法而不犯法。二是加强科学研究与监测。加强对中华穿山甲野外生态习性、繁殖行为及栖息地需求的研究,利用红外相机、分子生态学技术进行野外种群长期监测,以更好地了解其种群现状、分布变化及受胁因素,从而实施科学高效的保护拯救措施。进一步保护和恢复中华穿山甲的自然栖息地,减少人类活动对其生存环境的干扰和破坏,为中华穿山甲提供更多适宜的生存空间。三是加强人工繁育与野化工作。进一步深入开展中华穿山甲的人工繁育工作,探索人工种群野化放归的可能性,为野外种群恢复提供支持。四是提高公众意识与社区参与。进一步提高公众对中华穿山甲等濒危野生动物的保护意识,在中华穿山甲分布的社区开展科学教育,提高当地居民对中华穿山甲的保护意识,鼓励他们参与保护工作。五是积极寻求国际合作。全面促进和提升中华穿山甲保护研究水平和能力,共同打击跨国非法贸易链,参与全球穿山甲保护行动。通过这些努力,可以在多个层面为中华穿山甲提供更全面的保护和支持,中华穿山甲的保护效果有望得到提高,种群数量和分布区将逐渐恢复。

中华穿山甲是南方森林生态系统的重要组成部分,是反映森林生态系统结构、功能与健康的重要指标物种。虽然中华穿山甲保护研究工作取得了阶段性进展,但仍有大量的工作需要开展:中华穿山甲的野生种群状况不完全清楚,导致中华穿山甲濒危的关键因子不明确,栖息地恢复与管理技术缺乏,人工繁育技术存在瓶颈,种质保育与疾病防治技术存在较大障碍,国际社会和保护组织对中华穿山甲保护认知不一致等,亟需开展系统的科学研究和保护。

参考文献:

- Acharya S, Sharma H P, Bhattarai R, Poudyal B, Sharma S, Upadhaya S. 2021. Distribution and habitat preferences of the Chinese pangolin *Manis pentadactyla* (Mammalia: Manidae) in the mid-hills of Nepal [J]. *Journal of Threatened Taxa*, **13** (8): 18959–18966.
- An F Y, Wang K, Wei S C, Yan H M, Xu X L, Xu J Q, Sun S, Zou J J, Hou F H, Hua Y. 2023a. First case report of pustules associated with *Escherichia fergusonii* in the Chinese pangolin (*Manis pentadactyla aurita*) [J]. *BMC Veterinary Research*, **19** (1): 69. DOI: 10.1186/s12917-023-03622-3.
- An F Y, Yan H M, Xu X L, Kuang Y J, Hua Y, Liu Q S, Chi Q S, Wang K, Kuang Y J, Zhang Z D. 2023b. Comparison of venous blood gas and biochemical parameters in Sunda pangolin (*Manis javanica*) and Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) before and after Isoflurane Anesthesia [J]. *Animals*, **13** (7): 1162. DOI: 10.3390/ani13071162.
- Armstrong M D, Staal A, Abrams J F, Winkelmann R, Sakschewski B, Loriani S, Fetzter I, Cornell S E, Rockström J, Lenton T M. 2022. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points [J]. *Science*, **377** (6611): eabn7950. DOI: 10.1126/science.abn7950.
- Arora B, Pei K J, Ganswindt A. 2022. Seasonal pattern in serum estradiol, progesterone, and prolactin concentrations in rescued wild female taiwanese pangolin (*Manis pentadactyla pentadactyla*) [J]. *Journal of Zoological and Botanical Gardens*, **3**: 238–245.
- Bao F, Wu S, Su C, Yang L, Ma G. 2013. Air temperature changes in a burrow of Chinese pangolin, *Manis pentadactyla*, in winter [J]. *Folia Zoologica Praha*, **62** (1): 42–47.
- Barton D P, Martelli P, Worthington B M, Lam T T Y, Zhu X C, Shamsi S. 2022. Nematode and acanthocephalan parasites of confiscated Sunda pangolins, *Manis javanica* Desmarest, 1822 (Mammalia: Pholidota: Manidae), with an updated list of the parasites of pangolins [J]. *Diversity*, **14** (12): 1039. DOI: 10.3390/d14121039.
- Bell D, Robertson S, Hunter P R. 2004. Animal origins of SARS coronavirus: possible links with the international trade in small carnivores. *philosophical transactions of the royal society of London* [J]. *Series B: Biological Sciences*, **359** (1447): 1107–1114.
- Cao P, Dai Q L, Deng C, Zhao X, Qin S S, Yang J, Ju R, Wang Z W, Lu G P, Gu X D, Yang Z S, Zhu L F. 2021. Genome-wide signatures of mammalian skin covering evolution [J]. *Science China Life Sciences*, **64** (10): 1765–1780.
- Cen L, Xu L, Xu H, Xiang Y, Xue Z. 2010. Protection and cultivated technology of pangolin [J]. *Asia-Pacific Traditional Medicine*, **6**: 12–15.
- Cen P, Sun J, Wang Q, Zhang F, Mo L, Mahmood A, Li J, Wang Y, Wu S. 2023. Only sunda and Chinese pangolin (Pholidota) are naturally distributed in China [J]. *Integrative Zoology*, **18** (4): 704–709.
- Challender D W, Harrop S R, MacMilla D C. 2015. Understanding

- markets to conserve trade-threatened species in cites [J]. *Biology Conservation*, **187**: 249–259.
- Challender D W, Nash H C, Waterman C. 2020. *Pangolins: Science, Society and Conservation* [M]. 1st ed. London UK: Academic Press, **13**: 545–558.
- Challender D, Wu S, Kaspal P, Khatiwada A, Ghose A, Ching M S N, Mohapatra R K, Laxmi S T. 2019. *Manis pentadactyla* (errata version published in 2020) [EB/OL]. The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e. T12764A168392151.
- Challender D W S, Nguyen V T, Jones M, May L. 2012. Time-budgets and activity patterns of captive Sunda pangolins (*Manis javanica*) [J]. *Zoo Biology*, **31** (2): 206–218.
- Chang Y C, Lin Z Y, Lin Y X, Lin K H, Chan F T, Hsiao S T, Liao J W, Chiou H Y. 2021. Canine parvovirus infections in Taiwanese pangolins (*Manis pentadactyla pentadactyla*) [J]. *Veterinary Pathology*, **58** (4): 743–750.
- Chao J T, Tsao E H, Traylor H K, Reed D, Leus K. 2005. Formosan pangolin population and habitat viability assessment: final report [EB/OL]. IUCN/SSC Conservation Breeding Specialist Group, Apple Valley, MN, USA.
- Chao J. 1989. *Studies on the Conservation of the Formosan Pangolin (Manis pentadactyla pentadactyla)* I. *General Biology and Current Status* [M]. Division of Forest Biology, Taiwan Forestry Research Institute. Taiwan: Council of Agriculture, Executive Yuan.
- Chen T Y. 2021. Wound management with and without modified choukroun's platelet-rich fibrin in rescued formosan pangolins (*Manis pentadactyla pentadactyla*) [J]. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, **52** (2): 779–786.
- Chin J S, Tsao E H. 2015. Pholidota [A]. In: Miller R E, Fowler M E eds. *Fowler's Zoo and Wild Animal Medicine* [M]. volume 8. Saunders, St. Louis, USA, 369–375.
- Chin S C, Lien C Y, Chan Y T, Chen C L, Yang Y C, Ye L S. 2011. Monitoring the gestation period of rescued Formosan pangolin (*Manis pentadactyla pentadactyla*) with progesterone radioimmunoassay [J]. *Zoo Biology*, **31**: 479–489.
- Choo S W, Rayko M, Tan T K, Hari R, Komissarov A, Wee W Y, Yurchenko A A, Kliver S, Tamazian G, Antunes A, Wilson R K, Warren W C, Koepfli K P, Minx P, Krashenninnikova K, Kotze A, Dalton D L, Vermaak E, Paterson I C, Dobrynin P, Sitam F T, Rovie-Ryan J J, Johnson W E, Yusoff A M, Luo S J, Karuppannan K V, Fang G, Zheng D, Gerstein M B, Lipovich L, O'Brien S J, Wong G J. 2016. Pangolin genomes and the evolution of mammalian scales and immunity [J]. *Genome Research*, **26** (10): 1312–1322.
- Dawson S J, Broussard L, Adams P J, Moseby K E, Waddington K I, Kobryn H T, Bateman P W, Fleming P A. 2019. An outback oasis: the ecological importance of bilby burrows [J]. *Journal of Zoology*, **308** (3): 149–163.
- Dundas S J, Hopkins A J M, Ruthrof K X, Tay N E, Burgess T I, Hardy G E S J, Fleming P A. 2018. Digging mammals contribute to rhizosphere fungal community composition and seedling growth [J]. *Biodiversity Conservation*, **27**: 3071–3086.
- D'Cruze N, Singh B, Mookerjee A, Harrington L A, Macdonald D W. 2018. A socio-economic survey of pangolin hunting in Assam, Northeast India [J]. *Nature Conservation*, **30** (3): 83–105.
- Emry R J. 2004. The edentulous skull of the North American pangolin, *Patriomanis americanus* [J]. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, **285**: 130–138.
- Ferreira-Cardoso S, Billet G, Gaubert P, Delsuc F, Hautier L. 2020. Skull shape variation in extant pangolins (Pholidota: Manidae): allometric patterns and systematic implications [J]. *Zoological Journal of the Linnean Society*, **188** (1): 255–275.
- Gao H Y, Dou H L, Wang K, Zhang Y Q, Hua Y. 2024. Ensemble SDMs reveal the effect of environmental suitability and nature reserves on conserving Chinese pangolins in Guangdong, China [J]. *Journal for Nature Conservation*, **79**: 126617. DOI: 10.1016/j.jnc.2024.126617.
- Gao H Y, Dou H L, Wei S C, Sun S, Zhang Y, Hua Y. 2022. Local chronicles reveal the effect of anthropogenic and climatic impacts on local extinctions of Chinese pangolins (*Manis pentadactyla*) in mainland China [J]. *Ecology and Evolution*, **12** (10): e9388. DOI: 10.1002/ece3.9388.
- Gao W H, Lin X D, Chen Y M, Xie C G, Tang Z Z, Zhou J J, Chen S, Holmes E C, Zhang Y Z. 2020. Newly identified viral genomes in pangolins with fatal disease [J]. *Virus Evolution*, **6** (1): veaa020. DOI: 10.1093/ve/veaa020.
- Gaudin T J, Emry R J, Pogue B. 2006. A new genus and species of pangolin (Mammalia, Pholidota) from the late Eocene of Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **26** (1): 146–159.
- Gurung J B. 1996. A pangolin survey in royal nagarjung forest in kathmandu, nepal [J]. *Tiger Paper*, **23** (2): 29–32.
- Heath M E, Vanderlip S L. 1988. Biology, husbandry, and veterinary care of captive Chinese pangolins (*Manis pentadactyla*) [J]. *Zoo Biology*, **7**: 293–312.
- Hu J Y, Hao Z Q, Frantz L, Wu S F, Chen W, Jiang Y F, Wu H, Kuang W M, Li H, Zhang Y P, Yu L. 2020. Genomic consequences of population decline in critically endangered pangolins and their demographic histories [J]. *National Science Review*, **7** (4): 798–814.
- Hua L, Gong S, Wang F, Li W, Ge Y, Li X, Hou F. 2015. Captive breeding of pangolins: current status, problems and future prospects [J]. *Zookeys*, **507**: 99–114.
- Jones C G, Lawton J H, Shachak M. 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers [J]. *Ecology*, **78** (7): 1946–1957.
- Katuwal H B, Neupane K R, Adhikari D, Sharma M, Thapa S. 2015. Pangolins in eastern Nepal: trade and ethno-medicinal importance [J]. *Journal of Threatened Taxa*, **7** (9): 7563–7567.
- Kaspal P, Shah K B, Baral H S. 2016. *Saialak* [M]. Himalayan Nature, Kathmandu Nepal.
- Khatrri-Chhetri R, Sun C M, Wu H Y. 2015. Reference intervals for

- hematology, serum biochemistry, and basic clinical findings in free-ranging Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) from Taiwan [J]. *Veterinary Clinical Pathology*, **44** (3): 380–390.
- Khatri-Chhetri R, Wang H C, Chen C C, Shih H C, Liao H C, Sun C M, Khatri-Chhetri N, Wu H Y, Pei K J C. 2016. Surveillance of ticks and associated pathogens in free-ranging Formosan pangolins (*Manis pentadactyla pentadactyla*) [J]. *Ticks and Tick-borne Diseases*, **7** (6): 1238–1244.
- Li H F, Lin J S, Lan Y C, Pei K, Su N, Lin J S. 2011. Survey of the termites (Isoptera: Kalotermitidae, Rhinotermitidae, Termitidae) in a Formosan pangolin habitat [J]. *Florida Entomologist*, **94** (3): 534–538.
- Li Y, Hua Y, Xiang Z F, Xu X L, Zhang S X Y, Wang X H, An F Y, Ren Z Y, Wang K. 2024. Sperm collection and characteristics analysis of the critically endangered Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) [J]. *Conservation Physiology*, **13** (1): coae010. DOI: 10.1093/conphys/coae010.
- Lin M F, Chang C Y, Yang C W, Dierenfeld E S. 2015. Aspects of digestive anatomy, feed intake and digestion in the Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) at Taipei Zoo [J]. *Zoo Biology*, **34** (3): 262–270.
- Lin J S. 2011. Home range and burrow utilization in Formosan pangolin (*Manis pentadactyla pentadactyla*) at Luanshan, Taitung [D]. Master thesis. Taiwan: Pingtung University of Science and Technology.
- Louw M A, Haussmann N S, le Roux P C. 2019. Testing for consistency in the impacts of a burrowing ecosystem engineer on soil and vegetation characteristics across biomes [J]. *Scientific Reports*, **9**: 19355. DOI: 10.1038/s41598-019-55917-x.
- Mahmood A, Li J Q, Wu S B, Zhang F H. 2021. Faecal composition: an observation of food habits of Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) in a Subtropical Forest Associated Countryside in South China [J]. *Chiang Mai Journal of Science*, **48** (2): 373–381.
- Mohapatra R K, Panda S, Nair M V, Acharjyo L N. 2016. Check list of parasites and bacteria recorded from pangolins (*Manis* sp.) [J]. *Journal of Parasitic Diseases*, **40** (4): 1109–1115.
- Nash H C, Wong M H G, Turvey S T. 2016. Using local ecological knowledge to determine status and threats of the critically endangered Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) in Hainan, China [J]. *Biological Conservation*, **196** (3): 189–195.
- Nguyen V T, Clark L, Tran Q. 2010. Management guidelines for Sunda pangolin (*Manis javanica*) [M]. 1st ed. Vietnam: Carnivore and Pangolin conservation Program, Cuc Phuong National Park.
- Nino B, Kamada A J, Reuben D, Katzourakis A. 2023. Discovery of novel papillomaviruses in the critically endangered Malayan and Chinese pangolins [J]. *Biology Letters*, **19** (1): 20220464. DOI: 10.1098/rsbl.2022.0464.
- Pei K J C. 2010. Ecological study and population monitoring for the Taiwanese pangolin (*Manis pentadactyla pentadactyla*) in Luanshan area, Taitung [D]. Taiwan: Taitung Forest District Office Conservation Research.
- Pereira M, Jones G. 2020. Successful treatment of suspected gastrointestinal ulceration and Parasitism in a rescued Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) [J]. *Proceedings for the Zoo and Wildlife Health Conference, European Association of Zoo and Wildlife Veterinarians (EAZWV)*, **6** (1): 14–22.
- Pinto B, Valente R, Caramelo F, Ruivo R, Castro L F C. 2023. Decay of skin-specific gene modules in pangolins [J]. *Journal of Molecular Evolution*, **91** (4): 458–470.
- Que T, Li J, He Y, Li J, Chen P, Lin W, He M, Yu L, Wu A, Tan L, Li Y, Ling Y, Tong Y. 2022. Human parainfluenza 3 and respiratory syncytial viruses detected in pangolins [J]. *Emerging Microbes & Infections*, **11** (1): 1657–1663.
- Riddell E A, Iknayan K J, Hargrove L, Tremor S, Patton J L, Ramirez R, Wolf B O, Beissinger S R. 2021. Exposure to climate change drives stability or collapse of desert mammal and bird communities [J]. *Science*, **371** (6529): 633–636.
- Romero G Q, Goncalves-Souza T, Vieira C, Koricheva J. 2015. Ecosystem engineering effects on species diversity across ecosystems: a meta-analysis [J]. *Biological Reviews*, **90** (3): 877–890.
- Sharma S, Sharma H P, Chaulagain C, Katuwal H B, Belant J L. 2020. Estimating occupancy of Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) in a protected and non-protected area of Nepal [J]. *Ecology and Evolution*, **10** (10): 4303–4313.
- Sharma S, Sharma H P, Katuwal H B, Belant J L. 2020. Knowledge of the critically endangered Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) by local people in Sindhupalchok, Nepal [J]. *Global Ecology and Conservation*, **23**: e01052. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01052.
- Sun N C, Arora B, Lin J S, Lin W C, Chi M J, Chen C C, Pei C J C. 2019. Mortality and morbidity in wild Taiwanese pangolin (*Manis pentadactyla pentadactyla*) [J]. *PLoS ONE*, **14** (2): e0198230. DOI: 10.1371/journal.pone.0212960.
- Sun N C, Lin J S. 2019. Attaching tracking devices to pangolins, a comprehensive case study of Chinese pangolin *Manis pentadactyla* from southeastern Taiwan [J]. *Global Ecology and Conservation*, **20**: e00700. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00700.
- Sun N, Pei K, Wu L. 2021. Long term monitoring of the reproductive behavior of wild Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) [J]. *Scientific Reports*, **11** (1): 18116. DOI: 10.1038/s41598-021-97618-4.
- Sun S, Dou H L, Wei S C, Fang Y N, Long Z X, Wang J, An F Y, Xu J Q, Xue T T, Qiu H J, Hua Y, Jiang G H. 2021. A review of the engineering role of burrowing animals: implication of Chinese pangolin as an ecosystem engineer [J]. *Journal of Zoological Research*, **3** (3): 1–20.
- Sun S, Wei S C, Dou H L, Chen S L, Gao H Y, Yang J Z, Wang J X, Zhang Y L, Zhang Y H, Guo R P, Zhang S, Du Y M, Gao R Q, Kuang Y W, Hua Y. 2024. Identifying habitat modification by Chinese pangolin in subtropical forests of southern China [J]. *Integrative Zoology*, **20** (2): 361–375.
- Tamang S, Sharma H, Belant J. 2022. Foraging burrow site selection

- and diet of Chinese pangolins, Chandragiri municipality, Nepal [J]. *Animals*, **12** (19): 2518–2530.
- Touchard A, Dauvois M, Arguel M, Petitclerc F, Leblanc M, Dejean A, Orivel J, Nicholson G M, Escoubas P. 2014. Elucidation of the unexplored biodiversity of ant venom peptidomes via MALDI-TOF mass spectrometry and its application for chemotaxonomy [J]. *Journal of Proteomics*, **105**: 217–231.
- Trageser S J, Ghose A, Faisal M, Mro P, Rahman S C. 2017. Pangolin distribution and conservation status in Bangladesh [J]. *PLoS ONE*, **12** (4): e0175450. DOI: 10.1371/journal.pone.0175450.
- Wang K, Hou P, Xu X, Gao Y, Chen M, Lai B, An F, Ren Z, Li Y, Jia G, Hua Y. 2024. Automatic Identification of Pangolin behavior using deep learning based on temporal relative attention mechanism [J]. *Animals*, **14** (7): 1032. DOI: 10.3390/ani14071032.
- Wang Q, Lan T M, Li H M, Sahu S K, Shi M H, Zhu Y X, Han L, Yang S C, Li Q, Zhang L, Deng Z W, Liu H, Hua Y. 2022. Whole-genome resequencing of Chinese pangolins reveals a population structure and provides insights into their conservation [J]. *Communication Biology*, **5** (1): 821. DOI: 10.1038/s42003-022-03757-3.
- Wang S L, Tu Y C, Lee M S, Wu L H, Chen T Y, Wu C H, Tsao E H S, Chin S C C, Li W T. 2020. Fatal canine parvovirus-2 (CPV-2) infection in a rescued free-ranging Taiwanese pangolin (*Manis pentadactyla pentadactyla*) [J]. *Transboundary and Emerging Diseases*, **67** (3): 1074–1081.
- Wang X M, Janssens G P, Xie C G, Xie B W, Xie Z G, He H J, Wang Y N, Xu J. 2022. To save pangolins: a nutritional perspective [J]. *Animals*, **12** (22): 31–37.
- Wang X, Xu X, An F, Ren Z Y, Li Y Z, Wang K, Hua Y. 2024. Infantile hemangioma in a subadult Chinese pangolin: a case report [J]. *BMC Veterinary Research*, **20** (1): 31. DOI: 10.1186/s12917-023-03832-9.
- Wei S C, Sun S, Dou H L, An F Y, Gao H Y, Guo C, Hua Y. 2022. Influence of Pleistocene climate fluctuations on the demographic history and distribution of the critically endangered Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) [J]. *BMC Zoology*, **7** (1): 50. DOI: 10.1186/s40850-022-00153-6.
- Wei S C, Fan H Z, Zhou W L, Huang G P, Hua Y, Wu S B, Wei X, Chen Y T, Tan X Y, Wei F W. 2024. Conservation genomics of the critically endangered Chinese pangolin [J]. *Science China Life Sciences*, **67** (10): 2051–2061.
- Wicker L V, Lourens K, Hai L K. 2020. Veterinary health of pangolins [A]. In: Challender D W S, Nash H C, Waterman C eds. *Pangolins* [M]. 1st ed. London UK: Academic Press, 461–493.
- Wu S, Sun N C M, Zhang F, Yu Y, Ades G W, Suwal T L, Jiang Z. 2020. *Chinese Pangolin Manis Pentadactyla* (Linnaeus, 1758) *Pangolins* [M]. Academic Press.
- Wu S, Zhang F, Zou C, Wang Q, Li S, Sun R. 2016. A note on captive breeding and reproductive parameters of the Chinese pangolin, *Manis pentadactyla* Linnaeus, 1758 [J]. *Zookeys*, **618**: 129–144.
- Xian Y, Lu Y, Liu G. 2022. Is climate change threatening or beneficial to the habitat distribution of global pangolin species? Evidence from species distribution modeling [J]. *Science of The Total Environment*, **811**: 151385. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151385.
- Xu N, Yu J, Zhang F, Wu S, Zou C, W Q, Wang Y. 2022. Colony composition and nutrient analysis of *Polyrhachis dives* ants, a natural prey of the Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) [J]. *Zoo Biology*, **41** (2): 157–165.
- Yan D, Hu D, Li K, Li B, Zeng X, Chen J, Li Y, Wronski T. 2021. Effects of chronic stress on the fecal microbiome of Malayan pangolins (*Manis javanica*) rescued from the illegal wildlife trade [J]. *Current Microbiology*, **78** (3): 1017–1025.
- Yan D Y, Luo X, Tang J B, Xu S H, Huang K W, Wang X B, Feng T, Que T C, Jia M M, Guo X B, Rehman S U, Li Z P, Yang Y F, Li K X, Cui K Q, Ruan J, Liu Q Y. 2023. High-quality genomes of pangolins: insights into the molecular basis of scale formation and adaption to myrmecophagous diet [J]. *Molecular Biology and Evolution*, **40** (1): msac262. DOI: 10.1093/molbev/msac262.
- Yang C W, Chen S, Chang C Y, Lin M F, Block E, Lorentsen R, Chin J S, Dierenfeld E S. 2007. History and dietary husbandry of pangolins in captivity. *Zoo Biology*, **26** (3): 223–230.
- Ye R Z, Que T C, Xia L Y. 2022. Natural infection of pangolins with human respiratory syncytial viruses [J]. *Current Biology*, **32** (7): R307–R308.
- Zhang F H, Chen Y L, Tang X R, Xi F, Cen P, Pan Z M, Ye W X, Wu S B. 2024. Predicting the distribution and characteristics of Chinese pangolin habitat in China: implications for conservation [J]. *Global Ecology and Conservation*, **51**: e02907. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e02907.
- Zhang F, Min Y, Yu Y, Xu N. 2021. Vitamin a deficiency and its treatment in captive Sunda pangolins [J]. *Veterinary Medicine and Science*, **7** (2): 554–558.
- Zhang F H, Wang W H, Mahmood A, Wu S B, Li J Q, Xu N. 2021. Observations of Chinese pangolins (*Manis pentadactyla*) in mainland China [J]. *Global Ecology and Conservation*, **26**: e014600. DOI: 10.1016/j.gecco.2021.e014600.
- Zhang H, Li D, Wang C, Hull V. 2009. Delayed implantation in giant pandas: the first comprehensive empirical evidence [J]. *Reproduction*, **138** (6): 979–986.
- Zhang L N, Wang K, An F Y, Zhang D L, Zhang H L, Xu X L, Guo C, Yan H M, Kuang Y J, Zhang Z D, Lu R G, Hua Y. 2022. Fatal canine parvovirus type 2a and 2c infections in wild Chinese pangolins (*Manis pentadactyla*) in southern China [J]. *Transboundary and Emerging Diseases*, **69** (6): 4002–4008.
- Zhang Y L, Gao H Y, Dou H L, Yang J Z, Wang J X, Xiang Z F, Hua Y. 2024. Severe disturbance of Chinese pangolins caused by free-ranging domestic dogs in Unprotected Areas [J]. *Diversity*, **16** (7): 386.
- Zhou Z M, Zhao H, Zhang Z X, Wang Z H, Wang H. 2012. Allometry of scales in Chinese pangolins (*Manis pentadactyla*) and Malayan pangolins (*Manis javanica*) and application in judicial expertise [J]. *Zoological Research*, **33** (3): 271–275.

- 马云海, 佟金, 周江, 荣宝军, 任露泉. 2008. 穿山甲鳞片表面的几何形态特征及其性能 [J]. 电子显微学报, **27** (4): 336–340.
- 马梦杰, 李珺, 窦红亮, 王凯, 杨锦圳, 王静欣, 郭瑞萍, 王贺, 华彦. 2024. 基于 DNA 宏条形码技术的中华穿山甲食物组成与季节性变化 [J]. 生态学杂志, **44** (6): 2089–2095.
- 王嘉文, 王姝, 窦红亮, 徐华林, 陈婷, 侯方晖, 华彦. 2021. 深圳市内伶仃岛中华穿山甲冬季洞穴生境选择 [J]. 野生动物学报, **42** (3): 700–705.
- 华彦, 剡海阔, 安富宇. 2024. 中华穿山甲和马来穿山甲解剖学与组织学图谱 [M]. 北京: 中国林业出版社.
- 孙松. 2022. 中华穿山甲洞穴特征及其栖物种对穿山甲洞穴热避难所的利用研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文.
- 李旭, 周杰珑, 郭子发. 2010. 西双版纳地区穿山甲取食的几种蚂蚁营养成分分析 [J]. 四川动物, **29** (5): 620–621.
- 苏超. 2011. 中国穿山甲 (*Manis pentadactyla*) 洞穴生境选择及温度特征研究 [D]. 广州: 华南师范大学硕士学位论文.
- 吴诗宝, 马广智, 唐玫, 陈海, 徐昭荣, 刘发. 2002. 广东省穿山甲种群数量调查与资源蕴藏量 [J]. 兽类学报, **22** (4): 270–276.
- 吴诗宝, 刘迺发, 张迎梅, 欧志, 陈海. 2004a. 中国穿山甲和马来穿山甲头骨量度的测定及比较 [J]. 兽类学报, **24** (3): 211–214.
- 吴诗宝, 刘迺发, 马广智, 唐玫, 陈海, 徐昭荣. 2004b. 穿山甲生态学概况 [J]. 动物学杂志, **39** (2): 46–52.
- 吴诗宝, 刘廷发, 马广智, 徐昭荣, 陈海. 2004c. 大雾岭保护区穿山甲冬季生境选择 [J]. 生态学报, **23** (6): 1079–1086.
- 吴诗宝, 刘迺发, 李有余, 孙儒泳. 2005. 中国穿山甲的食性与觅食行为初步观察 [J]. 应用与环境生物学报, **11** (3): 337–341.
- 吴诗宝, 孙建坤, 岑鹏, 彭玉坤, 张富华. 2023. 国家一级保护动物中华穿山甲的种群现状及保护措施 [J]. 生物学通报, **58** (1): 9–14.
- 张圣. 2024. 中华穿山甲洞穴对火烧迹地动植物恢复的生态作用研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文.
- 张立, 李麒麟, 孙戈, 罗述金. 2010. 穿山甲种群概况及保护 [J]. 生物学通报, **45** (9): 1–4.
- 张燕洪, 万继录, 邓锦怡. 2024. 青狮潭水库大坝白蚁防治及自动化监测设计 [J]. 广西水利水电, **4**: 116–119.
- 柯亚永, 常弘, 吴诗宝. 1999. 穿山甲主要食物营养成分研究 [J]. 动物学研究, **5**: 394–395.
- 顾文仪, 陶素珍, 刘萍. 1983. 穿山甲饲养方法探索 [J]. 动物学杂志, **3**: 26–28.
- 胡诗佳, 彭建军, 于冬梅, 王利利, 辛翠娜, 张宇姝. 2010. 中华穿山甲的研究及保护现状 [J]. 四川动物, **29** (4): 673–675.
- 郭策. 2021. 穿山甲身体形态计量学及鳞片编码系统的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文.
- 郭策, 逯金瑶, 李思源, 姜宇泽, 梁春芳, 华彦, 李波, 李立, 唐松元, 徐艳春. 2022. 马来穿山甲和中华穿山甲鳞片编码系统及鳞片差异性 [J]. 野生动物学报, **43** (1): 24–31.
- 郭瑞萍. 2024. 基于卫星追踪的中华穿山甲家域和活动规律研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文.
- 彭杰. 2020. 中华穿山甲 (*Manis pentadactyla*) 的生态地理分布, 栖境选择及野生资源现状的研究 [D]. 重庆: 重庆师范大学硕士学位论文.
- 覃海林. 2024. 广西高峰林场桉树病虫害防治技术 [J]. 中国林副特产, **4**: 67–68.
- 崔相旭, 张宁, 王煜明, 任露泉, 徐晓波, 陈秉聪, 李安琪. 1990. 穿山甲鳞片成分与结构及其减粘脱土分析 [J]. 农业工程学报, **6** (3): 15–22.
- 塔旗, 李言阔, 范文青, 单继红, 涂晓斌, 应钦, 缪沪君, 邵瑞清, 申锦. 2021. 基于最大熵生态位模型的中华穿山甲潜在适宜生境预测 [J]. 生态学报, **41** (24): 9941–9952.
- 燕洪美. 2022. 中华穿山甲饲料消化与能量代谢特征研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文.
- 魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 蒋学龙, 刘少英. 2022. 中国兽类分类与分布 [M]. 北京: 科学出版社.