

编者按：我国已知的翼手目动物(俗称蝙蝠)有153种之多，约占全世界蝙蝠物种的10%。蝙蝠是唯一真正会飞的哺乳动物，主要依靠声信号(回声定位声波和通讯叫声)在黑暗的环境中活动。它们在生态系统中具有植物授粉、种子传播和害虫控制等重要作用且在中国传统文化中象征福气、长寿、吉祥和幸福，具有重要的生态和文化价值。然而，受气候变化、城镇化、山洞开发、滥捕滥杀、杀虫剂和环境污染等的影响，蝙蝠物种多样性和种群数量受到极大威胁。近年来，随着新技术和新方法的广泛应用，野外数据采集和实验设计更加科学有效，我国翼手类研究者产生出很多具有创新性的代表性成果，标志着我国在蝙蝠生物学研究方面取得了长足的进步和发展。因此，我刊特组织“蝙蝠生物学研究”专辑，该专辑发表3篇综述、7篇研究论文和5篇研究简报，内容包括蝙蝠的生态作用及对环境变化的响应和适应、声信号特征和功能、分类地位厘定、多样性与分布及新纪录描述等。这些文章涉及大蹄蝠(*Hipposideros armiger*)、东亚伏翼(*Pipistrellus abramus*)、亚洲长翼蝠(*Miniopterus fuliginosus*)、水甫管鼻蝠(*Murina shuipuenensis*)、柯氏长耳蝠(*Plecotus kozlovi*)、暗褐彩蝠(*Kerivoula furva*)及鼠耳蝠(*Myotis*)等。期望本专辑能够进一步推动我国蝙蝠生物学相关研究的深入开展，为深入理解其生态作用及物种多样性保护提供科学支持。

(本期责任编辑：江廷磊)

蝙蝠的生态系统服务研究进展

刘莹莹¹ 冯江^{1,2*} 江廷磊^{1*}

(1 东北师范大学, 吉林省动物资源保护与利用重点实验室, 长春 130117) (2 吉林农业大学生命科学学院, 长春 130118)

摘要：蝙蝠在生态系统中扮演着多重角色，通过多种生态系统服务对环境和社会产生了深远影响。本文总结蝙蝠生态系统服务的研究现状并对未来进行展望，重点探讨蝙蝠在供给服务、调节服务、文化服务和支持服务中的作用。在供给服务方面，蝙蝠为农业和医药领域提供了宝贵资源，特别是蝙蝠粪便(夜明砂)，不仅是传统中药的重要组成，还可以作为高效的有机肥料，显著提高土壤质量和作物产量。此外，蝙蝠的生物特性，如唾液中的抗凝血蛋白质和抗病毒成分，为新药研发提供了重要的基础，推动了生物技术和医学的创新。在调节服务方面，食虫蝙蝠不仅能够通过捕食作用减少农业害虫和降低农药的使用量，还能通过捕食风险效应对昆虫营造“恐惧景观”，改变猎物的行为和生理，进而降低其适合度。食果蝙蝠则能够为植物授粉和传播种子，提高作物生产的可持续性，促进生态系统健康。在文化服务方面，蝙蝠在中西方文化中均具有重要象征意义，并通过生态旅游为当地经济做出重要贡献。在支持服务方面，蝙蝠通过种子传播、植物授粉和养分循环，维持生态系统的健康与稳定。本文进一步展望了未来研究方向，提出保护蝙蝠及其生态系统服务功能的重要性，以应对全球环境变化带来的挑战，促进人类社会的可持续发展。

关键词：蝙蝠；生态系统服务；害虫控制；植物授粉；种子传播；生物多样性保护

中图分类号：Q958.1

文献标识码：A

文章编号：1000-1050(2025)02-0137-15

Research progress on ecosystem services provided by bats

LIU Yingying¹, FENG Jiang^{1,2*}, JIANG Tinglei^{1*}

(1 Jilin Provincial Key Laboratory of Animal Resource Conservation and Utilization, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

基金项目：国家自然科学基金(32430066, 32371562)；吉林省科技发展计划项目(20220101273JC)

作者简介：刘莹莹(1993-)，女，博士，主要从事动物行为生态与保护生物学研究。

收稿日期：2024-08-29；**接受日期：**2024-12-31

* 通讯作者, Corresponding authors, E-mail: fengj@nenu.edu.cn; jiangtl730@nenu.edu.cn

(2 College of Life Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Bats play multifaceted roles in ecosystems, profoundly impacting both the environment and human societies through their diverse ecosystem services. This review aims to summarize the current status and future prospects of studies concerning bat ecosystem services, with particular emphasis on their roles in provisioning, regulating, cultural, and supporting services. In terms of provisioning services, bats provide valuable resources for agriculture and medicine, particularly bat guano (known as ‘Ye Mingsha’), which is an important component in traditional Chinese medicine and can also serve as an efficient organic fertilizer that significantly improves soil quality and crop yields. Additionally, some biological characteristics of bats, such as anticoagulant proteins and antiviral compounds in their saliva, provide an essential basis for new drug development, driving innovation in biotechnology and medicine. In regulating services, insectivorous bats not only reduce agricultural pest populations and pesticide use but also create a ‘landscape of fear’ through predation risks, altering prey behavior and physiology, thereby further reducing their fitness. Frugivorous bats contribute to plant pollination and seed dispersal, improving crop production sustainability and enhancing ecosystem health. In cultural services, the image of bats holds significant symbolic meaning in both Eastern and Western cultures and contributes to local economies through eco-tourism. In supporting services, bats maintain ecosystem health and stability through seed dispersal, plant pollination, and nutrient cycling. The review also anticipates future research directions, underscoring the importance of protecting bats and their ecosystem services to address challenges posed by global environmental changes and to promote sustainable development in human societies.

Key words: Bats; Ecosystem services; Pest control; Pollination; Seed dispersal; Biodiversity conservation

生态系统服务是指人类从自然生态系统中所获得的全部收益,包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务(Costanza *et al.*, 1997; Millennium ecosystem assessment, 2005)。蝙蝠是一个具有自主飞行能力的多样化类群,现存1 400余种,是世界上分布最广、数量最多、进化最为成功的哺乳动物类群之一,其生态功能的多样性尤为突出(Kunz *et al.*, 2011; Boyles *et al.*, 2011)。蝙蝠通过其独特的生态功能,例如捕食害虫、授粉作用和种子传播以及作为研究模型等多种方式,为生态系统和人类社会提供了广泛的服务,对人类福祉也有直接和间接的重要影响(江廷磊等, 2020)。

虽然蝙蝠对生态系统和人类社会具有特殊的生态作用和意义,但相比于其他生物类群,蝙蝠的生态系统服务研究仍然相对薄弱(Ramirez-Francel *et al.*, 2022)。目前,全球范围内关于蝙蝠生态系统服务的研究仍然存在一定的局限性和挑战。同时,栖息地丧失和人类活动导致了大部分蝙蝠种群的衰退,进而损害了蝙蝠在生态系统中的服务功能。特别是在气候变化和人类活动加剧的背景下,如何有效保护蝙蝠物种多样性及其种群数量并充分利用其生态系统服务功能,已成为生态学和保护生物学研究的重要科学问题(Frick *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2023)。因此,了解和评估蝙蝠提

供的生态系统服务,对于制定有效的物种保护策略和可持续的资源管理方案至关重要。

本文旨在系统回顾和总结当前蝙蝠生态系统服务的研究现状,探讨其在不同生态系统中的作用和影响,并展望其未来研究的方向,以期促进对这一关键类群的深入研究和保护。

1 供给服务

在生态系统服务中,供给服务指自然生态系统提供的物质资源,这些资源直接为人类生活和经济发展提供支持。蝙蝠作为地球上多样性最为丰富的哺乳动物之一,长期以来为人类社会提供广泛的供给服务(图1),具体陈述如下。

1.1 蝙蝠在医药资源中的多重供给服务及其应用潜力

在医学领域,蝙蝠的供给服务具有重要意义。例如吸血蝙蝠(*Desmodus rotundus*)唾液中含有的纤溶酶原激活剂 Desmoteplase (DSPA-Alpha-1),能迅速溶解血栓,表现出优于传统溶栓剂的药理特性(Schleuning, 2002)。Draculin是一种从吸血蝙蝠唾液中提取的抗凝血蛋白质,能够抑制血液凝固,帮助吸血蝙蝠在吸食猎物的血液时保持血液流动(Fernandez *et al.*, 1999)。由于其独特的抗凝血特性,研究人员利用 Draculin 开发了能够溶解血栓、改善血液流动的药物,从而减少中风患者的后遗

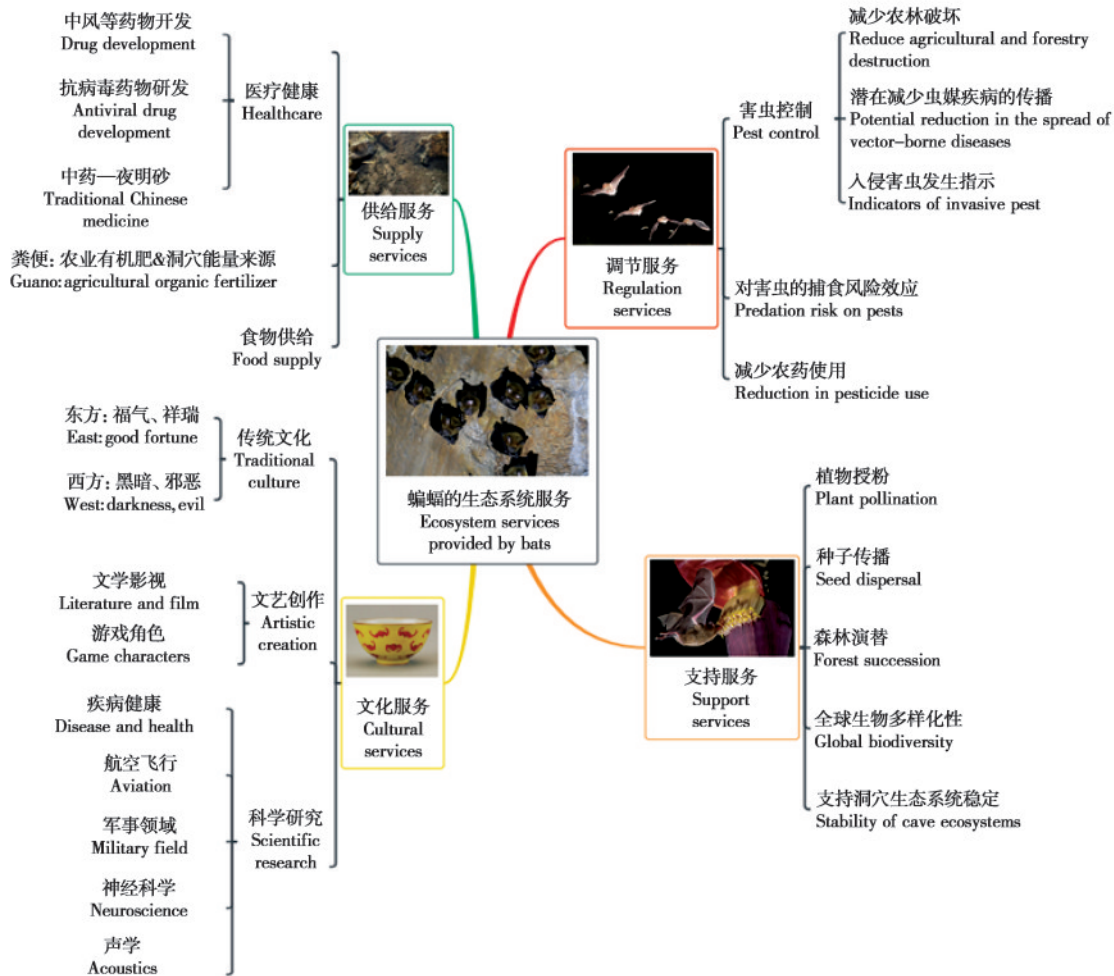


图1 蝙蝠的生态系统服务分类. 蝙蝠的生态系统服务以及供给服务的蝙蝠粪便配图由刘莹莹拍摄, 调节服务的配图由 Oriol Massana 拍摄 (Puig-Montserrat *et al.*, 2015); 支持服务配图由 Julian Schneider 拍摄 (Alpizar *et al.*, 2020); 文化服务配图源于故宫博物院 (故宫博物院, 2024)

Fig. 1 Ecosystem services classification provided by bats. The images of bat ecosystem services and the provisioning services provided by bat guano were taken by Liu Yingying; the photo of regulation services was taken by Oriol Massana (Puig-Montserrat *et al.*, 2015); the photo of support services was taken by Julian Schneider (Alpizar *et al.*, 2020); the cultural services image is sourced from the Palace Museum (Palace Museum, 2024)

症。Draculin 的发现不仅引起了医学界的广泛关注, 还在治疗血栓性疾病 (中风和心脏病等) 方面具有巨大潜力 (Apitz-Castro *et al.*, 1995)。此外, 吸血蝙蝠唾液中的一种新型 XIa 抗凝血因子: Desmolaris, 不仅能有效抑制体内炎症和血栓形成, 而且具有不干扰正常止血机制的特点 (Ma *et al.*, 2013)。在最新的研究中, 科学家们发现蝙蝠细胞中的 *MTHFD1* 基因可能抵抗多种病毒, 为开发广谱抗病毒治疗提供了新的靶点 (Anderson *et al.*, 2021)。这些案例凸显了蝙蝠在医学供给服务中的重要性, 特别是在生物技术和药物开发领域。

蝙蝠的干燥粪便 (夜明砂) 作为一种重要的传统药材, 始载于《神农本草经》, 在中医药领域有着悠久的历史。传统上被用于清热明目、散血消积, 尤其在治疗眼疾方面具有潜在价值 (Ricucci, 2012)。发酵后的夜明砂在抗氧化和抗炎作用方面也有独特的作用, 拓展了其在现代医学中的应用潜力 (Lee *et al.*, 2019)。现代研究进一步揭示了夜明砂具有多种化学物质和生物活性成分, 证实了其药用价值, 并强调了在使用前对其进行严格处理和质量控制的重要性, 以确保其安全性和有效性 (李灿和周跃华, 2020; Zhang *et al.*, 2022)。

1.2 蝙蝠粪便在洞穴与农业生态系统中的关键作用

在洞穴生态系统中,蝙蝠粪便作为一种关键的有机物质,为洞穴内的微生物、昆虫以及其他洞穴生物提供了重要的营养来源 (Sakoui *et al.*, 2020)。这些生物利用蝙蝠粪便中的养分进行生长和繁殖,从而维持了洞穴内的生物多样性和生态平衡。这些养分输入对于洞穴这种相对封闭和资源匮乏的生态系统尤为重要,确保了这一特殊环境中的生命循环得以持续。

在农业生产中,蝙蝠的粪便作为有机肥料具有显著的增产效果。蝙蝠粪便富含氮、磷和钾等关键营养元素,对提高土壤质量和作物产量至关重要 (Misra *et al.*, 2019; Marwa *et al.*, 2021)。一项在柬埔寨开展的研究表明,施用蝙蝠粪便的5种经济植物生长速率显著高于化学肥料处理,包括辣木 (*Moringa oleifera*)、菠萝蜜 (*Artocarpus heterophyllus*)、龙眼 (*Dimocarpus longan*)、茄子 (*Solanum melongena*) 和木瓜 (*Carica papaya*), 突出了蝙蝠粪便作为高效有机肥料的潜力 (Sothearen *et al.*, 2014)。

此外,在一些地区,特别是东南亚、太平洋岛屿以及部分西印度洋岛屿,蝙蝠作为食物被广泛猎杀和食用,尤其是果蝠属 (*Pteropus*) 的一些物种在当地饮食文化中占据重要地位 (Mickleburgh *et al.*, 2009; Kamins *et al.*, 2011)。例如在印度尼西亚和菲律宾,果蝠被认为是传统佳肴,经常用于制作节庆和传统仪式中的特殊菜肴 (Mickleburgh *et al.*, 2009; Mildenstein *et al.*, 2016)。然而,持续的猎杀对蝙蝠种群大小构成了威胁,不仅减弱了蝙蝠的生态作用,也带来了潜在的疾病传播风险 (Mickleburgh *et al.*, 2009; Kurpiers *et al.*, 2016)。

2 调节服务

调节服务是生态系统服务的重要组成部分,是指自然生态系统通过调节环境条件和生态过程,为人类社会提供的诸多间接益处 (Mengist *et al.*, 2020)。蝙蝠作为生态系统中的重要组成部分,在调节服务方面发挥着不可或缺的作用 (图1)。蝙蝠通过捕食害虫来有效控制农业和自然生态系统中害虫种群,从而减少农药使用,维护生态系统的健康与平衡。因此,探讨蝙蝠在调节服务中的作用,不仅有助于深化我们对生态系统复杂性的理解,还为蝙蝠保护和生态系统管理提供了新的思路。

2.1 蝙蝠的害虫控制服务

在蝙蝠提供的调节服务中,害虫控制作用尤为突出。这种生物控制作用不仅直接促进农业生产,还对维护生态系统的健康和稳定发挥了关键作用。超过2/3的蝙蝠物种专性或兼性以昆虫为食,能够每晚捕食相当于其体重70%~100%的昆虫量 (Kunz *et al.*, 2011)。随着DNA宏条形码 (DNA metabarcoding) 和环境DNA (e-DNA) 等现代分子生物学技术的发展,人们对蝙蝠在捕食害虫方面的理解得以深化 (Aizpurua *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2021)。Aizpurua等 (2018) 通过e-DNA分析法,发现普通长翼蝠 (*Miniopterus schreibersii*) 在全欧洲范围内能捕食超过200种节肢动物,其中44种为农业害虫,涉及水稻、苹果、蓝莓等多种作物,且普通长翼蝠可根据当地农田中可利用食物资源调整食性,重塑食性生态位 (Aizpurua *et al.*, 2018)。基于DNA宏条形码分析,发现81种蝙蝠捕食涵盖14目66属694种农业害虫 (Tuneu-Corral *et al.*, 2023), 涉及农业、林业和疾病传播等多个方面。蝙蝠的害虫控制服务不仅保护了作物,也增强了生态系统的功能和农业生产的可持续性。

蝙蝠经常出没于农田,伺机捕食夜行性农业害虫 (Federico *et al.*, 2008; Heim *et al.*, 2017)。因为蝙蝠活动的高峰与农作物害虫的爆发具有一定的同步性,致使墨西哥游离尾蝠 (*Tadarida brasiliensis*) 能够及时响应并抑制害虫的爆发,从而有效减轻多种农业生态系统中的作物损失 (McCracken *et al.*, 2012; Puig-Montserrat *et al.*, 2015)。此外,蝙蝠通过捕食农业害虫,降低了农业生产对农药的依赖,这不仅减少了经济成本,还带来了显著的环境效益。农药使用量减少不仅能够减少其对土壤和水质的污染,还能保护农田生态系统中的有益生物,增强农田生物多样性,并减少对人类健康的潜在风险。同时,农药使用量的减少还可以减缓害虫产生抗药性,从而维持农药的长期有效性。除了害虫捕食服务外,蝙蝠亦可通过间接抑制与虫害相关的真菌生长及有毒化合物的产生而进一步造福人类 (Maine and Boyles, 2015)。此外,由于多种主要的农业害虫具有迁徙行为,因此蝙蝠赋予农业的贡献可能会扩展到数百千米以外的其他农业景观,远远超出蝙蝠捕食害虫的范围 (Lee and McCracken, 2005; McCracken *et al.*,

2008)。许多农业害虫在幼虫阶段能对作物造成损害, 而蝙蝠能够对其成虫进行捕食, 从而阻止成虫产卵, 进而降低幼虫的出生率。因此, 蝙蝠对害虫的捕食可能会在农业生态系统中产生级联效应 (Karp and Daily, 2014), 间接地提升作物的产量和质量, 进而直接惠益于当地农民。

中国蝙蝠生态系统服务的研究起步相对较晚, 但近年来, 国内研究人员在蝙蝠害虫控制服务领域取得了积极的进展 (刘莹莹, 2024)。通过 DNA 宏条形码技术分析, 发现尽管中国南阳地区小规模农户种植系统中的 7 种蝙蝠: 中菊头蝠 (*Rhinolophus affinis*)、小菊头蝠 (*R. pusillus*)、大卫鼠耳蝠 (*Myotis davidii*)、亚洲长翼蝠 (*Miniopterus fuliginosus*)、普氏蹄蝠 (*Hipposideros pratti*)、东亚伏翼 (*Pipistrellus abramus*) 和白腹管鼻蝠 (*Murina leucogaster*) 呈现显著的食性生态位分化, 但它们主要捕食鳞翅目、双翅目和鞘翅目害虫; 7 种蝙蝠捕食的 75 种昆虫可能危害农林生态系统或传播疾病 (Liu et al., 2024a)。进一步分析发现, 7 种同域蝙蝠物种在食性上表现出显著分化, 且这种分化不仅受形态学参数的影响, 还与声波参数相关, 这些因素共同影响了蝙蝠食性生态位, 促进了蝙蝠多物种共存 (Liu et al., 2024a)。而对贵州的 10 种蝙蝠 (中华菊头蝠 *R. sinicus*、贵州菊头蝠 *R. rex*、皮氏菊头蝠 *R. pearsonii*、南蝠 *Ia io*、大足鼠耳蝠 *Myotis pilosus*、华南水鼠耳蝠 *M. laniger*、西南鼠耳蝠 *M. altarium*、中华鼠耳蝠 *M. chinensis*、大蹄蝠 *H. armiger*、中蹄蝠 *H. larvatus*) 的食性分析发现, 它们能捕食 19 目 96 科的昆虫, 其中 57.8% 是农业和林业害虫; 且在农业、林业、畜牧业和人类生活 4 个产业中, 蝙蝠消耗害虫的比例均超过了 50%, 且农业和林业害虫的比例更高, 分别为 67% 和 74% (Wang et al., 2024b)。此外, 通过对中国云南的 4 种食虫蝙蝠: 大蹄蝠、黑髯墓蝠 (*Taphozous melanopogon*)、三叶小蹄蝠 (*Aselliscus stoliczkanus*) 和亚洲长翼蝠的活动及食性进行研究, 发现蝙蝠的捕食行为会随害虫资源的动态变化而调整, 显示蝙蝠在捕食不同害虫时的行为可塑性 (Zhu et al., 2024)。这种功能响应表明, 蝙蝠在生态系统中能够有效应对害虫数量的波动, 从而在害虫控制中发挥关键作用。此外, 基于蝙蝠食性中包含大量鳞翅目昆虫这一背景, 研究发现蝙蝠能够在

重大入侵害虫草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) 密度极低的发生初期对其进行捕食, 较传统方法提前近一个月检测到草地贪夜蛾的出现, 进一步证明了蝙蝠作为入侵害虫监测工具的有效性和实用性 (Liu et al., 2023)。综上, 这些研究均强调了蝙蝠在害虫管理和生态系统服务中的重要作用。

2.2 蝙蝠害虫控制服务的经济价值

蝙蝠在农业生态系统中作为害虫控制者产生了显著的经济价值, 且已有多项研究对其经济效益进行了评估。这些研究主要集中在美国、澳大利亚、南非、泰国、西班牙、印度尼西亚、巴西、智利和英国等国家, 涉及棉花、坚果、稻田、可可、玉米和葡萄园等多种作物 (表 1)。在多数生态系统中, 蝙蝠通过控制害虫从而显著提升作物产量, 其害虫控制的生态服务价值尤为突出。例如在德克萨斯州中南部, 每年由墨西哥游离尾蝠捕食害虫而避免棉花受损以及避免使用杀虫剂的价值约为 741 000 美元, 占棉花最终产值的 15% (Cleveland et al., 2006); 根据这一数据估算北美食虫蝙蝠在美国棉花田中提供的生态系统服务价值约为每年 229 亿美元 (Boyles et al., 2011); 这一估算不仅考虑了美洲棉铃虫 (*Helicoverpa zea*) 可能引起的作物损伤, 还包括与农药应用相关的经济节约开支。在泰国, 皱唇犬吻蝠 (*Mops plicatus*) 通过捕食二化螟 (*Chilo suppressalis*), 可防止稻米损失近 2 900 t, 产生的经济价值超过 120 万美元, 这意味着泰国的蝙蝠每年能够为近 26 200 人提供口粮 (Puig-Montserrat et al., 2015)。Linden 等 (2019) 估计蝙蝠在南非坚果园中的经济价值约为每年每公顷 2 421.61 美元, 这些效益与坚果的产量和质量都有关 (Linden et al., 2019)。通过综合分析澳大利亚树栖型蝙蝠垂缨蝶蝠 (*Chalinolobus gouldii*) 的食性、平均每日能量需求、猎物的能量含量以及棉花作物中蝙蝠觅食次数的声学数据, 发现蝙蝠每年通过捕食棉铃虫 (*Helicoverpa armigera*) 可为棉花种植带来高达 6 360 万美元的经济价值 (Kolkert et al., 2021)。通过蝙蝠排除实验, 研究学者发现排除蝙蝠后南非咖啡种植园中咖啡总产量下降了 27% (Linden et al., 2019), 美国玉米地块中玉米穗的感染率显著提高了 56% (Maine and Boyles, 2015)。在智利的葡萄园中, 蝙蝠对害虫的捕食作用能够对昆虫种群产生下行效应, 从而减

少了葡萄园 7% 的产量损失, 带来的经济效益约为每年每公顷 188 ~ 248 美元 (Rodríguez-San Pedro *et al.*, 2020)。通过这些方法评估蝙蝠作为害虫抑制

者提供的生态系统服务至关重要, 有助于深入了解它们对农业的真正益处。

表 1 评估蝙蝠害虫控制服务的经济价值的研究

Table 1 Studies assessing the economic value of the ecosystem services provided by bats

国家 Country	作物类型 Crop	经济价值 Economic value /(USD/hm ² /year)	总金额 Total amount /(USD/year)	方法 Method
美国 USA	棉花 Cotton	183. 11 [29. 90 ~ 426. 26]	741 000 [121 000 ~ 1 725 000]	避免成本模型 Avoided cost model (Cleveland <i>et al.</i> , 2006)
美国 USA	棉花 Cotton	86 (传统棉花, 使用农药 Conventional cotton, Pesticide use), 683 (传统棉花, 不使用农药 Conventional cotton, Non-pesticide); 46 (<i>Bt</i> 抗虫棉, 使用农药 <i>Bt</i> cotton, Pesticide use), 214 (<i>Bt</i> 抗虫棉, 不使用农药 <i>Bt</i> cotton, Non-pesticide)	688 000 (传统棉花 Conventional cotton)	避免成本模型 Avoided cost model (Federico <i>et al.</i> , 2008)
美国 USA	棉花 Cotton	182. 90* [29. 66 ~ 427. 58]*	229 亿 [37 亿 ~ 530 亿] 22. 9 billion [3. 7 billion ~ 53 billion]	避免成本模型 Avoided cost model (Boyles <i>et al.</i> , 2011)
泰国 Thailand	稻田 Rice	—	121 万 [48 万 ~ 195 万] 1. 21 million [0. 48 ~ 1. 95]	避免成本模型 Avoided cost model (Wanger <i>et al.</i> , 2014)
美国 USA	棉花 Cotton	34. 05*	1 224 万 12. 24 million	避免成本模型 Avoided cost model (Lopez-Hoffman <i>et al.</i> , 2014)
		66. 65 (1990) ~ 13. 58 (2008)	2 396 万 (1990) ~ 488 万 (2008) [23. 96 million (1990) ~ 4. 88 (2008)]	
美国和墨西哥 USA & Mexico	棉花 Cotton	—	1 167 万 11. 67 million	避免成本模型 Avoided cost model (Wiederholt <i>et al.</i> , 2015)
西班牙 Spain	稻田 Rice	25. 18 (21€)	—	避免成本模型 Avoided cost model (Puig-Montserrat <i>et al.</i> , 2015)
美国 USA	棉花 Cotton	[0. 01 ~ 8. 06]	1 224 万 12. 24 million	避免成本模型 Avoided cost model (Wiederholt <i>et al.</i> , 2017)
美国和墨西哥 USA & Mexico	棉花 Cotton	[0. 01 ~ 8. 06]	1 288 万 12. 88 million	避免成本模型 Avoided cost model (Lopez-Hoffman <i>et al.</i> , 2017)
南非 South Africa	坚果 Macadamia	56. 81 ~ 138. 91	142 万 ~ 348 万 1. 42 million ~ 3. 48 million	避免成本模型 Avoided cost model (Taylor <i>et al.</i> , 2018)
澳大利亚 Australia	棉花 Cotton	干旱 <i>Bt</i> 棉 99 ~ 126; 灌溉 <i>Bt</i> 棉 286 ~ 361 Dryland <i>Bt</i> cotton 99 ~ 126; Irrigated <i>Bt</i> -cotton 286 ~ 361	6 360 万 63. 6 million	避免成本模型 Avoided cost model (Kolkert <i>et al.</i> , 2021)
巴西 Brazil	玉米 Corn	94	39 060 万 390. 6 million	避免成本模型 Avoided cost model (Aguar <i>et al.</i> , 2021)
英国 UK	苹果 Apple	372 ~ 731	—	避免成本模型 Avoided cost model (Murphy and Ament, 2022)
印度尼西亚 Indonesia	可可 Cacao	730 (排除鸟类和蝙蝠 Exclusion both of birds and bats)	—	排除实验 Enclosure experiment (Maas <i>et al.</i> , 2013)
哥斯达黎加 Costa Rica	咖啡 Coffee	0 (对产量无显著影响 No significant impact on yield)	0	排除实验 Enclosure experiment (Karp <i>et al.</i> , 2013; Karp and Daily, 2014)
美国 USA	玉米 Corn	7. 88 (传统玉米 Conventional corn)	> 10 亿 (全球范围) > 1 billion (globally)	排除实验 Enclosure experiment (Maine and Boyles, 2015)
印度尼西亚 Indonesia	可可 Cacao	0 (对产量无显著影响 No significant impact on yield)	0	排除实验 Enclosure experiment (Gras <i>et al.</i> , 2016)
南非 South Africa	坚果 Macadamia	2 421. 61	—	排除实验 Enclosure experiment (Linden <i>et al.</i> , 2019)
智利 Chile	葡萄园 Vineyard	188 ~ 248	—	排除实验 Enclosure experiment (Rodríguez-San Pedro <i>et al.</i> , 2020)
意大利 Italy	苹果 Apple	597 (551 €)	—	排除实验 Enclosure experiment (Ancillotto <i>et al.</i> , 2024)

表格中方括号内的数值表示数据的范围, 上限和下限为评估结果的置信区间, 表明不同情景下可能的最大和最小经济价值的估值

The values in square brackets in the table represent the range of data, with the upper and lower limits indicating the confidence interval of the assessment results, reflecting the possible maximum and minimum economic value estimates under different scenarios

然而, 蝙蝠并非在所有农业生产中都具有显著的生态价值。例如在热带可可种植系统中, 研究学者发现排除蝙蝠后对作物产量没有明显影响。这可能是因为蝙蝠在控制植食性害虫方面的作用有限, 而其他捕食者(蚂蚁和鸟类等)可能已经足够有效地发挥生物控制的功能, 从而掩盖了蝙蝠的贡献(Gras *et al.*, 2016)。在哥斯达黎加咖啡种植园中排除蝙蝠后, 蜘蛛和其他捕食性节肢动物的数量显著增加, 捕食者与食草动物的比例也随之提高, 表明蝙蝠在咖啡种植中的生态服务价值并不显著。因此, 在不同生态系统中, 蝙蝠的经济价值也会存在较大的差异(Karp *et al.*, 2013; Karp and Daily, 2014)。

2.3 蝙蝠对害虫的捕食风险效应及其生态影响

除直接捕食作用外, 捕食者引发的“恐惧景观”(Landscape of fear)作为一种潜在的生态过程, 影响着猎物的生理、行为和适合度等多个方面(Siepielski *et al.*, 2014; Abram *et al.*, 2019)。同样, 蝙蝠的捕食风险对夜行性昆虫也能产生显著的非消耗性影响(Non-consumptive effects), 涉及生理、行为和适合度的多种反应。食虫蝙蝠主要通过回声定位捕食蛾类, 而一些蛾类则进化出能够侦听蝙蝠回声定位声波的听器, 以应对蝙蝠的捕食(Sears *et al.*, 2006)。大多数蛾类听器的最佳调谐频率范围在20~50 kHz, 与多种蝙蝠回声定位声波的主频范围相似(Waters, 1996)。电生理实验表明, 夜蛾可以感知到10~100 kHz甚至更高频率的超声波(Vorontsov and Lapshin, 2002)。因此, 具有听器的蛾类能够在未被蝙蝠直接捕食之前感知到蝙蝠的存在, 从而触发一系列反应, 如逃避行为、栖息环境的转换、防御形态的变化、生活史和资源分配的调整等, 展现出多样的反捕食策略(Svensson *et al.*, 2003)。尽管这些响应通常能够降低猎物的被捕食风险, 但也可能带来一定的代价, 例如捕食风险可能影响猎物的死亡率和繁殖能力, 最终引起猎物种群数量的变化。研究表明, 即使蝙蝠并未直接捕食斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*), 其捕食风险仍能显著影响斜纹夜蛾的生长、发育、繁殖和激素水平, 表现为斜纹夜蛾幼虫的发育速度加快, 食物摄入量增加, 但成虫体型变小, 死亡率上升, 繁殖行为和生育力均有所下降(Zhang *et al.*, 2023)。暴露于不同类别的蝙蝠捕食风险下,

棉铃虫能够表现出可塑的性状响应, 包括逃避能力增强、发育加速以及适应度下降, 分子生物学研究进一步揭示了与这些变化相关的代谢和应激反应通路的变化(Liu *et al.*, 2024b)。这些研究表明蝙蝠捕食风险通过非消耗性效应对猎物的生理和生态产生了显著影响, 从而可能开发成为一种有效的生物防治策略。

3 文化服务

文化服务是生态系统服务的一项重要内容, 指的是自然生态系统通过提供精神、审美、教育和娱乐等非物质价值, 对人类文化和社会生活产生的影响(Stålhammar and Pedersen, 2017)。蝙蝠作为神秘而独特的生物, 在全球各地的文化中占据着重要地位。它们不仅是中国传统文化中“福气”和“长寿”的象征, 还在西方文化中被赋予了黑暗、神秘和超自然的象征意义, 广泛出现在文学、影视作品及游戏元素中(图1)。探讨蝙蝠的文化服务, 不仅揭示其在不同文化背景下的象征意义, 还强调了蝙蝠保护对文化多样性和生态旅游发展的重要性。

3.1 蝙蝠在中西方文化中的象征意义与文学表现

在中国古典文学中, 蝙蝠经常被用作文学象征, 代表着长寿和幸福。许多诗人和文学家将蝙蝠融入诗歌和故事中, 以表达对自然界奇观的赞美和对生活的美好祝愿(白皎皎, 2018)。南宋诗人范成大有诗《蝙蝠》:“伏翼昏飞急, 营营定苦饥。聚蚊充口腹, 生汝亦奚为!”现代书画家、散文家丰子恺在《护生画集》中写到:“蝙蝠栖古屋, 蛰伏过三冬。春夏乘夜出, 翩翩飞碧空。不食人间粟, 为人除害虫。人人应爱惜, 此蝠与福同。”对蝙蝠进行高度赞扬(李典, 2006)。

在中国传统文化中, 由于“蝠”与“福”在汉语中同音, 蝙蝠被广泛视为福气和幸运的象征, 其形象常见于各种艺术作品和日常用品。尤其在明清时期, 蝙蝠图案常与“福”字结合, 寓意吉祥深远, 代表“五福临门”的美好愿望。这类图案频繁出现在家居装饰、服饰和宫廷瓷器以及建筑物上, 如清代乾隆时期的瓷器上就常见蝙蝠纹饰, 既美观又象征吉祥(陈又林和李合胜, 2013)。蝙蝠的文化内涵在福文化中占据重要地位, 其图案不仅限于视觉艺术, 还融入民间信仰和文化实践, 成为传统吉祥文化的重要组成部分(张建鑫,

2019)。而在西方文化中,蝙蝠常被赋予神秘、黑暗和恐怖的象征,尤其在文学、电影和万圣节等文化活动中,蝙蝠成为恐怖元素的代表(赵军, 2006)。

3.2 蝙蝠在文化创作与生态旅游中的象征与价值

蝙蝠的神秘形象和独特行为在艺术、文学和电影中激发了丰富的创作灵感,广泛出现在文学和影视作品中,如《西游记》、《活佛济公》。此外,蝙蝠也被广泛用于游戏元素中。在西方,蝙蝠出现在书籍、电影以及各类视觉艺术作品中。蝙蝠的夜行特性不仅赋予其深刻的象征意义,而且成为多样文化符号和艺术表达的灵感来源。

蝙蝠洞和蝙蝠观赏活动吸引着世界各地的游客,为当地社区带来经济收益。例如美国德克萨斯州奥斯汀国会大厦大桥下的蝙蝠群出飞的壮观景象每年吸引成千上万游客前来观赏。菲律宾长滩岛蝙蝠洞,我国河南南阳云华蝙蝠洞和福建周宁蝙蝠洞等,均通过卡斯特地貌溶洞观蝙蝠旅游为当地带来一定收入,给当地经济发展注入活力。然而,大规模的洞穴游玩与开发可能破坏蝙蝠的自然栖息地,扰乱其栖息与繁衍(吴涛等, 2018)。

3.3 蝙蝠在科学研究中的关键角色与应用

蝙蝠作为地球上唯一真正会飞的哺乳动物,因其独特的生理特性和行为模式,在科学研究中扮演了重要角色,并为多个领域的技术创新提供了宝贵的自然模型。它们不仅在生态学和生物学研究中具有不可替代的地位,还在医学、导航和航天等领域展现了广泛的应用潜力。

蝙蝠在医学研究中扮演着至关重要的角色,其独特的生物学特性提供了宝贵的研究模型。蝙蝠不仅因为其超常的长寿和低癌症发病率而受到科学家的关注,而且其在DNA修复和端粒维护方面的独特机制也为抗衰老和抗癌研究提供了新方向(Foley *et al.*, 2018; Gorbunova *et al.*, 2020)。有研究人员将致癌基因*HRASG12V*和*SV40LT*同时过表达到大足鼠耳蝠等7种蝙蝠物种的成纤维细胞中,然后通过软琼脂克隆形成实验和裸鼠*Mus musculus*异种移植实验分别从体外水平和体内水平验证蝙蝠的抗癌表型。结果发现,大足鼠耳蝠的成纤维细胞未出现恶性增殖,表明其具有抗癌能力。转录组测序和功能实验进一步表明,*HIF1A*、*COPS5*和*RPS3*基因表达下调与抗肿瘤能力相关。

基于分子演化分析,研究揭示大足鼠耳蝠在*COPS5*基因上游丢失了*HIF1A*结合位点,导致*COPS5*下调,从而赋予其抗癌能力。这一发现为癌症研究提供了新的动物模型和机制思路(Hua *et al.*, 2024)。此外,蝙蝠免疫系统展现出独特的调控机制,能够承载多种病毒而不发病,这为疾病机制的理解和新型疗法的开发提供重要视角(Letko *et al.*, 2020)。因此,虽然蝙蝠长寿和免疫机制的研究尚处于初期,但进一步深入的研究不仅为人类理解疾病机制和开发新型抗病毒疗法提供重要启示,也为人类健康长寿研究提供新的理论基础。

蝙蝠在空间导航领域为科研提供了重要启发,尤其是在复杂环境下的导航与定位。蝙蝠作为唯一能在3D空间中飞行的哺乳动物,为大脑空间导航机制及神经科学领域的研究提供了独特的实验模型(Wohlgemuth *et al.*, 2016; Forli and Yartsev, 2023)。研究发现,蝙蝠大脑海马体的导航细胞在处理3D空间中的位置信息和方向感知时,表现出独特的各向同性特征(Yartsev and Ulanovsky, 2013)。蝙蝠的高时间精度回声定位进一步揭示了大脑“GPS”系统的快速重置能力,并展示了在视觉与听觉线索下,位置信息处理的差异(Jones and Moss, 2021)。最近的研究发现,库氏伏翼(*Pipistrellus kuhlii*)能够依靠回声定位在千米级范围内完成精准导航,即使在视觉、磁感应和嗅觉被剥夺的条件下,库氏伏翼仍能通过环境回声信息识别位置并进行定向飞行(Goldshtein *et al.*, 2024)。这一研究证实了回声定位蝙蝠可以利用环境中的声学特征构建认知地图,从而实现复杂环境下的高效导航。这一发现不仅对理解动物的导航策略提供全新视角,也为现代导航技术的发展带来深远影响。例如蝙蝠的声学认知地图能力为无人机和自动驾驶系统在复杂环境中的路径规划和环境感知提供了仿生设计灵感。此外,这一原理也为深地探测器和水下声纳技术提供了新的研究思路,帮助解决在极端环境下的信号处理和方向感知难题,为现代导航技术的发展提供了生物学灵感。

蝙蝠的飞行行为同样在现代航空设计中具有深远影响,特别是在灵活的翼型结构和高度适应性的飞行控制方面(Yu and Guan, 2015)。研究表明,蝙蝠的翼由多关节骨骼和可扩展的弹性膜组

成, 这种结构能够显著增强飞行器在低速飞行和复杂气流环境下的稳定性与灵活性, 对现代航空设计, 尤其是在无人机和空中飞行器的开发中具有重要的应用意义 (Hedenström and Johansson, 2015)。例如蝙蝠翼的可变形结构为飞行器设计中流体动力学和气动效率的优化提供了思路, 从而提升飞行器在低速和复杂气流条件下的机动性与稳定性, 将为解决人类技术中的极限飞行任务和环境感知难题提供创新方案 (Wang *et al.*, 2024a)。

蝙蝠的回声定位能力为航空航天及军事技术的发展提供了重要启示, 特别是在雷达和声纳系统的设计方面。在夜间或低能见度环境中, 蝙蝠能够依靠环境中的声学特征定位目标, 这为军事装备在黑夜或战场烟雾中执行隐蔽任务提供了仿生解决方案。例如仿生声学导航系统可以应用于潜艇和地面装甲设备, 在不依赖卫星导航的情况下, 通过周围环境的声学回波定位, 减少被敌方探测的风险。蝙蝠通过熟练的回声定位声波定位障碍物和猎物, 并能有效地应对同域物种和背景噪音干扰。这种能力使得蝙蝠能够在复杂环境中精准捕猎, 为科学家开发更先进的雷达和声纳设备提供灵感 (Roeleke *et al.*, 2022)。此外蝙蝠的听觉系统在适应回声定位方面表现出明显的特化, 从外周到中枢形成了对声频率极为有序的特征 (付子英等, 2022)。这些特性使得蝙蝠能够在黑暗环境中精确定位目标, 为军事领域的隐蔽导航和目标探测技术提供了参考模型。

4 支持服务

支持服务是生态系统服务的基础, 是指维持生物多样性和生态系统功能的关键过程 (Fu *et al.*, 2013)。蝙蝠在生态系统中通过其独特的行为和生态功能, 提供了重要的支持服务 (图 1) (Kunz *et al.*, 2011)。它们在种子传播、植物授粉和营养循环等方面发挥关键作用, 尤其在热带和亚热带地区, 帮助维持森林的结构和功能。探讨蝙蝠的支持服务, 有助于更全面地理解其在生态系统中的重要性, 并为保护蝙蝠及其栖息地提供科学依据。

4.1 蝙蝠对全球生物多样性的作用

蝙蝠作为全球范围内分布最广的哺乳动物之一, 是支持全球生物多样性的关键组成部分, 其物种多样性的研究一直在持续。随着我国生物多样性调查的深入, 近年持续报道了蝙蝠新种和新

纪录。例如在对四川省的一项调查中, 研究人员发现了管鼻蝙蝠新种——锦鑫管鼻蝠 *Murina jin-chui* sp. Nov (Yu *et al.*, 2020); 在中国青藏高原地区发现了蝙蝠新种——玉树管鼻蝠 *Murina yushuensis* sp. nov (Wang *et al.*, 2024c)。蝙蝠新种的发现丰富了中国及全球蝙蝠物种的多样性, 表明在全球气候变化的背景下, 青藏高原等高海拔地区可能隐藏着更多尚未被发现的物种。此外, 近年来, 很多中国新纪录种也在陆续被发现。例如在福建武夷山国家公园发现菲氏管鼻蝠 (*Murina feae*) 和艾氏管鼻蝠 (*M. eleryi*) (黄泽锋等, 2023), 以及在西藏地区发现安氏长舌果蝠 (*Macroglossus sobrinus*) 和艾氏管鼻蝠 (刁海欣等, 2024)。新种的发现和新纪录的报道不仅丰富了我们对于蝙蝠生物多样性的认识, 对蝙蝠分类地位的不断探讨也突显了生态学和分类学研究的重要性 (黄正澜懿, 2020; Liang *et al.*, 2023)。因此, 对蝙蝠物种多样性的广泛调查和深入研究, 有助于我们更好地评估其在生态系统中提供的服务, 进而为全球生物多样性保护策略的制定提供科学支持。

4.2 蝙蝠在植物授粉中的关键作用及其经济效益

食果蝙蝠在热带和亚热带生态系统的植物授粉中发挥着重要作用, 尤其在夜间开花的植物中, 它们凭借长舌头、宽大翼膜和回声定位等独特特征, 能够高效获取花蜜并完成授粉 (Raghuram *et al.*, 2011)。食蜜蝙蝠的夜间授粉活动与白天授粉的昆虫和鸟类形成互补, 延长了植物的授粉时间窗口, 并通过长距离飞行促进广泛区域内的花粉传播, 增强了植物的基因流动, 从而维持了生态系统的生物多样性和稳定性 (Gonzalez-Gutierrez *et al.*, 2022; Domingos-Melo *et al.*, 2023)。据不完全统计, 全球植食性蝙蝠为 28 目 67 科 528 种被子植物授粉, 包括许多果树、仙人掌及其他经济植物 (Kunz *et al.*, 2011)。例如一些植食性蝙蝠是榴梿 (*Durio zibethinus*) 最有效的授粉媒介, 通过增加授粉成功率显著提高果实的坐果率, 对榴梿果实的产量和质量具有显著影响 (Bumrungsri *et al.*, 2009; Baqi *et al.*, 2022); 植食性蝙蝠 (特别是 *Glossophaga soricina*) 在香蕉种植中同样扮演着重要的授粉角色 (Alpizar *et al.*, 2020)。此外, 蝙蝠的授粉服务对农业生产和生态系统的稳定性也具有显著的经济效益 (Zalipah *et al.*, 2016)。例如多种植食性蝙

蝠为香蕉 (*Musa spp.*)、龙眼 (*Dimocarpus longan*)、荔枝 (*Litchi chinensis*) 等多种经济作物授粉, 显著提高了作物的产量和质量, 间接支持了全球食品供应链的稳定。缺少蝙蝠授粉的仙人掌 (*Stenocereus queretaroensis*) 的果实产量会下降 35%, 且果实质量显著降低, 如重量减轻 46% 和糖分降低 13% (Tremlett *et al.*, 2020)。

4.3 蝙蝠的种子传播和森林演替作用及其生态影响

蝙蝠在热带和亚热带地区通过取食水果来传播种子, 促进了植物繁殖和森林再生。这些植物通过吸引蝙蝠, 采取了特定的适应策略, 如大而明亮的花朵、夜间释放的香味以及柔软多汁的果实, 以满足吸引蝙蝠为其授粉和传播种子的生态需求 (Kunz *et al.*, 2011)。由于蝙蝠具备飞行能力, 能够在大片森林区域内甚至跨区域传播种子, 使其成为关键的生态工程师。研究显示, 当蝙蝠食用这些果实时, 种子通过其消化道被带到远离母树的地方, 从而扩展了植物种群的分布范围, 这在经历自然灾害或人为活动影响后森林的恢复和演替过程中尤为重要 (Muscarella and Fleming, 2007)。食果蝙蝠通过长距离种子传播 (long-distance seed dispersal, LDS), 不仅有助于将种子分布到新的生境中, 还能够跨越开阔地带, 将种子从一个森林斑块传播到另一斑块, 促进植物种群之间的基因流动并维持其遗传多样性 (Muscarella and Fleming, 2007)。此外, 一些研究发现, 经过蝙蝠消化道后的种子, 种皮变得更为柔软, 发芽成功率更高, 从而进一步支持植物种群的健康和整个生态系统的功能 (Dumont, 1999; Rojas *et al.*, 2011)。然而, 一项荟萃分析表明, 种子通过蝙蝠消化道后对发芽的影响具有不均一性, 具体表现为不同植物和蝙蝠种类间的差异 (Saldaña-Vázquez *et al.*, 2019)。因此, 未来的研究应进一步探讨蝙蝠消化对种子发芽的具体影响, 以更好地理解蝙蝠种子传播能力在生态系统中的功能。

5 结论与展望

蝙蝠作为生态系统的重要组成部分, 提供了显著的生态系统服务, 包括有效的害虫控制、增产的有机肥料和丰富的文化价值。它们不仅在农业生产中减少农药使用, 提升作物产量, 还在医学研究和传统文化中扮演重要角色。然而, 蝙蝠

正面临栖息地丧失、气候变化、人为干扰等多重威胁, 这些因素不仅危及蝙蝠的生存, 还可能削弱它们提供的关键生态服务 (Frick *et al.*, 2020)。因此, 蝙蝠物种多样性保护是促进可持续发展的关键, 建议未来的研究从以下几个方面展开。

5.1 多样化生态服务及其经济价值的系统评估

虽然蝙蝠在生态系统中发挥着多重生态服务功能, 但目前的研究大多集中于蝙蝠在害虫控制方面的作用, 对其他生态服务的认识仍显不足 (Ramirez-Francel *et al.*, 2022)。因此, 未来应在全球不同区域全面评估蝙蝠在不同生态系统中的多样化服务, 特别是其在授粉和种子传播中的贡献, 以及这些服务对植物多样性和森林生态系统稳态的影响。其次, 需要更加精细化地评估蝙蝠在不同农业生产系统中的经济价值。未来研究应借助新的技术手段, 针对多种农业场景, 如果园、粮食作物、经济作物等, 进行系统的经济评估, 以明确蝙蝠的贡献在不同条件下的变化。这将有助于制定有效的农业管理策略, 最大化蝙蝠的生态服务价值, 支持农业的可持续发展。

5.2 蝙蝠与其他类群的生物控制协同效应研究

蝙蝠在生态系统中与其他生物控制类群 (鸟类、蚂蚁等) 共同发挥重要的生物控制作用, 它们之间的协同效应值得深入研究 (Maas *et al.*, 2016; Cassano *et al.*, 2016)。未来的研究应特别关注蝙蝠与这些其他捕食者在不同生态系统中的互动作用, 探讨它们在害虫控制中的协同或竞争关系, 以及这些关系如何影响整体生态系统的平衡与健康。例如在一些农业生态系统中, 鸟类在白天捕食害虫, 而蝙蝠则在夜间接替这一角色, 这种昼夜协同作用可能显著提高害虫的控制效率 (Maas *et al.*, 2016)。因此, 未来应系统评估这种捕食生态位的分化对害虫种群动态的综合影响, 以及它对农业生产的潜在经济效益。其次, 未来还应探讨人类活动如何影响蝙蝠与其他类群的生物控制协同作用。例如农药的使用可能会对蚂蚁或鸟类等捕食者产生负面影响, 从而间接削弱蝙蝠与这些捕食者之间的协同效应。因此, 有必要通过实地实验和模型模拟, 评估人类活动对这些捕食者之间协同效应的影响, 并提出相应的生态管理建议。

5.3 人类活动对蝙蝠生态服务的影响及应对策略

气候变化、土地利用和农药使用等常常导致

蝙蝠栖息地的破坏与片段化, 直接影响蝙蝠种群的生存与繁殖, 是蝙蝠多样性下降的主要原因之一, 进而影响蝙蝠的生态系统服务功能 (Rebelo *et al.*, 2010; Park, 2015; Oliveira *et al.*, 2020; 耿江天等, 2024)。为应对这些挑战, 未来研究应致力于量化人类活动对蝙蝠生态服务的具体影响, 并提出相应的保护与应对策略。例如通过创建和保护适宜的蝙蝠栖息地、推广减少农药使用的农业示范, 以及制定适应气候变化的管理措施, 可以有效减缓人类活动对蝙蝠的负面影响, 从而维持其生态服务功能。

5.4 蝙蝠生态服务的时空尺度动态变化

蝙蝠生态服务在不同时间尺度上表现出动态变化, 这些变化可能受季节、气候变化以及长期环境变迁的影响。未来研究应加强对蝙蝠生态服务在季节性和长期时间尺度上的动态变化的研究 (Ghanem and Voigt, 2012)。例如蝙蝠的害虫控制能力在不同季节可能有所不同, 特别是在害虫繁殖高峰期, 蝙蝠的捕食行为对控制害虫的作用尤为重要。此外, 气候变化可能对蝙蝠的迁徙模式、繁殖行为及其提供的生态服务产生重要影响 (Festa *et al.*, 2023)。因此, 研究这些生态服务在长期气候变化背景下的动态变化, 有助于预测未来生态系统功能的变化, 并制定相应的管理策略, 从而为生态系统的可持续管理提供科学支持。

参考文献:

- Abram P K, Brodeur J, Urbaneja A, Tena A. 2019. Nonreproductive effects of insect parasitoids on their hosts. *Annual Review of Entomology*, **64**: 259–276.
- Aguiar L M S, Bueno-Rocha I D, Oliveira G, Pires E S, Vasconcelos S, Nunes G L, Frizzas M R, Togni P H B. 2021. Going out for dinner—The consumption of agriculture pests by bats in urban areas. *PLoS ONE*, **16** (10). DOI: 10.1371/journal.pone.0258066.
- Aizpurua O, Budinski I, Georgiakakis P, Gopalakrishnan S, Ibanez C, Mata V, Rebelo H, Russo D, Szodoray-Paradi F, Zhelyazkova V, Zrncic V, Gilbert M T P, Alberdi A. 2018. Agriculture shapes the trophic niche of a bat preying on multiple pest arthropods across Europe: evidence from DNA metabarcoding. *Molecular Ecology*, **27** (3): 815–825.
- Alpizar P, Schneider J, Tschapka M. 2020. Bats and bananas: Simplified diet of the nectar-feeding bat *Glossophaga soricina* (Phyllostomidae: Glossophaginae) foraging in Costa Rican banana plantations. *Global Ecology and Conservation*, **24**. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01254.
- Ancillotto L, Borrello M, Caracciolo F, Dartora F, Ruberto M, Rummo R, Scaramella C, Odore A, Garonna A P, Russo D. 2024. A bat a day keeps the pest away: bats provide valuable protection from pests in organic apple orchards. *Journal for Nature Conservation*, **78**. DOI: 10.1016/j.jnc.2024.126558.
- Anderson D E, Cui J, Ye Q, Huang B, Tan Y, Jiang C, Zu W, Gong J, Liu W, Kim S Y. 2021. Orthogonal genome-wide screens of bat cells identify MTHFD1 as a target of broad antiviral therapy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **118** (39). DOI: 10.1073/pnas.2104759118.
- Apitz-Castro R, Beguin S, Tablante A, Bartoli F, Holt J C, Hemker H C. 1995. Purification and partial characterization of draculin, the anticoagulant factor present in the saliva of vampire bats (*Desmodus rotundus*). *Thrombosis and Haemostasis*, **73** (1): 94–100.
- Baqi A, Lim V C, Yazid H, Anwarali Khan F A, Lian C J, Nelson B R, Sathya Seelan J S, Appalasamy S, Mokhtar S I, Kumaran J V. 2022. A review of durian plant-bat pollinator interactions. *Journal of Plant Interactions*, **17** (1): 105–126.
- Boyles J G, Cryan P M, McCracken G F, Kunz T H. 2011. Economic importance of bats in agriculture. *Science*, **332** (6025): 41–42.
- Bumrungsri S, Sripaoraya E, Chongsiri T, Sridith K, Racey P A. 2009. The pollination ecology of durian (*Durio zibethinus*, Bombacaceae) in southern Thailand. *Journal of Tropical Ecology*, **25** (1): 85–92.
- Cassano C R, Silva R M, Mariano-Neto E, Schroth G, Faria D. 2016. Bat and bird exclusion but not shade cover influence arthropod abundance and cocoa leaf consumption in agroforestry landscape in northeast Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **232**: 247–253.
- Cleveland C J, Betke M, Federico P, Frank J D, Hallam T G, Horn J, Lopez J D, McCracken G F, Medellín R A, Moreno-Valdez A, Sansone C G, Westbrook J K, Kunz T H. 2006. Economic value of the pest control service provided by Brazilian free-tailed bats in south-central Texas. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **4** (5): 238–243.
- Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387** (6630): 253–260.
- Domingos-Melo A, Albuquerque-Lima S, Diniz U M, Lopes A V, Machado I C. 2023. Bat pollination in the Caatinga: a review of studies and peculiarities of the system in the new world's largest and most diverse seasonally dry tropical forest. *Flora*, **305**. DOI: 10.1016/j.flora.2023.152332.
- Dumont E R. 1999. The effect of food hardness on feeding behaviour in frugivorous bats (Phyllostomidae): an experimental study. *Journal of Zoology*, **248** (2): 219–229.
- Federico P, Hallam T G, McCracken G F, Purucker S T, Grant W E, Correa-Sandoval A N, Westbrook J K, Medellín R A, Cleveland C J, Sansone C G, Lopez J D, Betke M, Moreno-Valdez A, Kunz T H. 2008. Brazilian free-tailed bats as insect pest regulators in

- transgenic and conventional cotton crops. *Ecological Applications*, **18** (4): 826–837.
- Fernandez A Z, Tablante A, Beguín S, Hemker H C, Apitz-Castro R. 1999. Draculin, the anticoagulant factor in vampire bat saliva, is a tight-binding, noncompetitive inhibitor of activated factor X. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure and Molecular Enzymology*, **1434** (1): 135–142.
- Festa F, Ancillotto L, Santini L, Pacifici M, Rocha R, Toshkova N, Amorim F, Benítez-López A, Dómer A, Hamidović D. 2023. Bat responses to climate change: a systematic review. *Biological Reviews*, **98** (1): 19–33.
- Foley N M, Hughes G M, Huang Z, Clarke M, Jebb D, Whelan C V, Petit E J, Touzalin F, Farcy O, Jones G. 2018. Growing old, yet staying young: the role of telomeres in bats' exceptional longevity. *Science Advances*, **4** (2). DOI: 10.1126/sciadv.aao0926.
- Forli A, Yartsev M M. 2023. Hippocampal representation during collective spatial behaviour in bats. *Nature*, **621** (7980): 796–803.
- Frick W F, Kingston T, Flanders J. 2020. A review of the major threats and challenges to global bat conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1469** (1): 5–25.
- Fu B, Wang S, Su C, Forsius M. 2013. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **5** (1): 4–10.
- Gao H, Xiang Z, He J, Luo B, Wang W, Deng Y, Yang R, Zhou W, Zhou D, Jiang Y. 2023. Using expert knowledge to identify key threats and conservation strategies for wildlife: a case study with bats in China. *Global Ecology and Conservation*, **41**. DOI: 10.1016/j.gecco.2022.e02364.
- Ghanem S J, Voigt C C. 2012. Increasing awareness of ecosystem services provided by bats. *Advances in the Study of Behavior*, **44**: 279–302.
- Goldshtein A, Chen X, Amichai E, Boonman A, Harten L, Yinon O, Orchan Y, Nathan R, Toledo S, Couzin I D, Yovel Y. 2024. Acoustic cognitive map-based navigation in echolocating bats. *Science*, **386** (6652): 561–567.
- Gonzalez-Gutierrez K, Castaño J H, Perez-Torres J, Mosquera-Mosquera H R. 2022. Structure and roles in pollination networks between phyllostomid bats and flowers: a systematic review for the Americas. *Mammalian Biology*, **102** (1): 21–49.
- Gorbunova V, Seluanov A, Kennedy B K. 2020. The world goes bats: living longer and tolerating viruses. *Cell Metabolism*, **32** (1): 31–43.
- Gras P, Tschamtké T, Maas B, Tjoa A, Hafsa A, Clough Y. 2016. How ants, birds and bats affect crop yield along shade gradients in tropical cacao agroforestry. *Journal of Applied Ecology*, **53** (3): 953–963.
- Hedenström A, Johansson L C. 2015. Bat flight: aerodynamics, kinematics and flight morphology. *The Journal of Experimental Biology*, **218** (5): 653–663.
- Heim O, Lorenz L, Kramer-Schadt S, Jung K, Voigt C C, Eccard J A. 2017. Landscape and scale-dependent spatial niches of bats foraging above intensively used arable fields. *Ecological Processes*, **6**: 1–15.
- Hua R, Ma Y S, Yang L, Hao J J, Hua Q Y, Shi L Y, Yao X Q, Zhi H Y, Liu Z. 2024. Experimental evidence for cancer resistance in a bat species. *Nature Communications*, **15** (1). DOI: 10.1038/s41467-024-45767-1.
- Jones T K, Moss C F. 2021. Visual cues enhance obstacle avoidance in echolocating bats. *Journal of Experimental Biology*, **224** (9). DOI: 10.1242/jeb.241968.
- Kamins A O, Restif O, Ntiama-Baidu Y, Suu-Ire R, Hayman D T, Cunningham A A, Wood J L, Rowcliffe J M. 2011. Uncovering the fruit bat bushmeat commodity chain and the true extent of fruit bat hunting in Ghana, West Africa. *Biological Conservation*, **144** (12): 3000–3008.
- Karp D S, Daily G C. 2014. Cascading effects of insectivorous birds and bats in tropical coffee plantations. *Ecology*, **95** (4): 1065–1074.
- Karp D S, Mendenhall C D, Sandi R F, Chaumont N, Ehrlich P R, Hadly E A, Daily G C. 2013. Forest bolsters bird abundance, pest control and coffee yield. *Ecology Letters*, **16** (11): 1339–1347.
- Kolkert H, Smith R, Rader R, Reid N. 2021. Insectivorous bats provide significant economic value to the Australian cotton industry. *Ecosystem Services*, **49**. DOI: 10.1016/j.ecoser.2021.101280.
- Kunz T H, de Torrez E B, Bauer D, Lobova T, Fleming T H. 2011. Ecosystem services provided by bats. *Year in Ecology and Conservation Biology*, **1223**: 1–38.
- Kurpiers L A, Schulte-Herbrüggen B, Ejotire I, Reeder D A M. 2016. Bushmeat and emerging infectious diseases: Lessons from Africa. *Problematic Wildlife*, 507–551.
- Lee H S, Chon S H, Kim M A, Park J E, Lim Y M, Kim E J, Son E K, Kim S J, So J H. 2019. Fermentation enhances the antioxidant and anti-inflammatory effects of Bat Faeces (Ye Ming Sha) via the ERK, p38 MAPK and NF-κB signaling pathways in RAW 264.7 cells. *Journal of Applied Biological Chemistry*, **62** (1): 57–66.
- Lee Y F, McCracken G F. 2005. Dietary variation of Brazilian free-tailed bats links to migratory populations of pest insects. *Journal of Mammalogy*, **86** (1): 67–76.
- Letko M, Seifert S N, Olival K J, Plowright R K, Munster V J. 2020. Bat-borne virus diversity, spillover and emergence. *Nature Reviews Microbiology*, **18** (8): 461–471.
- Liang X, Xie H, Li Y, Huang Z, Li S, Wu Y, Yu W. 2023. First record of the flat-skulled woolly bat *Kerivouladepressa* and the Indochinese woolly bat *K. dongduongana* (Chiroptera, Vespertilionidae) in China. *ZooKeys*, **1149**. DOI: 10.3897/zookeys.1149.85821.
- Linden V M G, Grass I, Joubert E, Tschamtké T, Weier S M, Taylor P J. 2019. Ecosystem services and disservices by birds, bats and monkeys change with macadamia landscape heterogeneity. *Journal of Applied Ecology*, **56** (8): 2069–2078.

- Liu Y, Geng Y, Huang Z, Feng J, Jiang T. 2024a. Pest suppression services and dietary niche differentiation of bats in Chinese smallholder farming systems: Implications for integrated pest management. *Journal of Pest Science*, **97** (3): 1587–1603.
- Liu Y, Geng Y, Si M, Zhu D, Huang Z, Yin H, Zeng H, Feng J, Jiang T. 2024b. Trait responses, nonconsumptive effects, and the physiological basis of *Helicoverpa armigera* to bat predation risk. *Communications Biology*, **7** (1). DOI: 10.1038/s42003-024-07166-6.
- Liu Y, Si M, Huang Z, Feng J, Jiang T. 2023. Bats are sentinels for invasive pest surveillance based on DNA metabarcoding. *Ecological Indicators*, **152**: 1–7.
- Lopez-Hoffman L, Diffendorfer J, Wiederholt R, Bagstad K J, Thogmartin W E, McCracken G, Medellin R L, Russell A, Semmens D J. 2017. Operationalizing the telecoupling framework for migratory species using the spatial subsidies approach to examine ecosystem services provided by Mexican free-tailed bats. *Ecology and Society*, **22** (4). DOI: 10.5751/ES-09589-220423.
- Lopez-Hoffman L, Wiederholt R, Sansone C, Bagstad K J, Cryan P, Diffendorfer J E, Goldstein J, Lasharr K, Loomis J, McCracken G, Medellin R A, Russell A, Semmens D. 2014. Market forces and technological substitutes cause fluctuations in the value of bat pest-control services for cotton. *PLoS ONE*, **9** (2). DOI: 10.1371/journal.pone.0087912.
- Luo B, Xu R, Li Y, Zhou W, Wang W, Gao H, Wang Z, Deng Y, Liu Y, Feng J. 2021. Artificial light reduces foraging opportunities in wild least horseshoe bats. *Environmental Pollution*, **288**: 117765.
- Ma D, Mizurini D M, Assumpcao T C F, Li Y, Qi Y, Kotsyfakis M, Ribeiro J M C, Monteiro R Q, Francischetti I M B. 2013. Desmolaris, a novel factor XIa anticoagulant from the salivary gland of the vampire bat (*Desmodus rotundus*) inhibits inflammation and thrombosis in vivo. *Blood*, **122** (25): 4094–4106.
- Maas B, Clough Y, Tschamtké T. 2013. Bats and birds increase crop yield in tropical agroforestry landscapes. *Ecology Letters*, **16** (12): 1480–1487.
- Maas B, Karp D S, Bumrungsri S, Darras K, Gonthier D, Huang J C C, Lindell C A, Maine J J, Mestre L, Michel N L, Morrison E B, Perfecto I, Philpott S M, Sekercioglu C H, Silva R M, Taylor P J, Tschamtké T, Van Bael S A, Whelan C J, Williams-Guillen K. 2016. Bird and bat predation services in tropical forests and agroforestry landscapes. *Biological Reviews*, **91** (4): 1081–1101.
- Maine J J, Boyles J G. 2015. Bats initiate vital agroecological interactions in corn. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112** (40): 12438–12443.
- Marwa E M, Andrew T, Hatibu A A. 2021. Challenges facing effective use of bat guano as organic fertilizer in crop production: A review. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, **8** (8): 8–13.
- McCracken G F, Gillam E H, Westbrook J K, Lee Y F, Jensen M L, Balsley B B. 2008. Brazilian free-tailed bats (*Tadarida brasiliensis*: Molossidae, Chiroptera) at high altitude: links to migratory insect populations. *Integrative and Comparative Biology*, **48** (1): 107–118.
- McCracken G F, Westbrook J K, Brown V A, Eldridge M, Federico P, Kunz T H. 2012. Bats track and exploit changes in insect pest populations. *PLoS ONE*, **7** (8). DOI: 10.1371/journal.pone.0043839.
- Mengist W, Soromessa T, Feyisa G L. 2020. A global view of regulatory ecosystem services: existed knowledge, trends, and research gaps. *Ecological Processes*, **9**: 1–14.
- Mickleburgh S, Waylen K, Racey P. 2009. Bats as bushmeat: a global review. *Oryx*, **43** (2): 217–234.
- Mildenstein T, Tanshi I, Racey P A. 2016. Exploitation of bats for bushmeat and medicine. In: Voige C C, Kingston T eds. *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Springer International Publishing, 325–375.
- Millennium ecosystem assessment M. 2005. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, DC: Island Press.
- Misra P K, Gautam N K, Elangovan V. 2019. Bat guano: a rich source of macro and microelements essential for plant growth. *Annals of Plant and Soil Research*, **21** (1): 82–86.
- Murphy F, Ament J. 2022. Pluralistic valuation of codling moth regulation by brown long-eared bats in English apple orchards. *Sustainability*, **14** (19). DOI: 10.3390/su141911966.
- Muscarella R, Fleming T H. 2007. The role of frugivorous bats in tropical forest succession. *Biological Reviews*, **82** (4): 573–590.
- Oliveira J M, Destro A L F, Freitas M B, Oliveira L L. 2020. How do pesticides affect bats? – A brief review of recent publications. *Brazilian Journal of Biology*, **81** (2): 499–507.
- Park K J. 2015. Mitigating the impacts of agriculture on biodiversity: bats and their potential role as bioindicators. *Mammalian Biology*, **80** (3): 191–204.
- Puig-Montserrat X, Torre I, Lopez-Baucells A, Guerrieri E, Monti M, Rafols-Garcia R, Ferrer X, Gisbert D, Flaquer C. 2015. Pest control service provided by bats in Mediterranean rice paddies: linking agroecosystems structure to ecological functions. *Mammalian Biology*, **80** (3): 237–245.
- Raghuram H, Singaravelan N, Nathan P T, Rajan K, Marimuthu G. 2011. Foraging ecology of pteropodid bats: pollination and seed dispersal. In: Zupan J L, Mlakar S L eds. *Bats: Biology, Behavior and Conservation*. Nova Science Publishers, 177–188.
- Ramirez-Francel L A, Garcia-Herrera L V, Losada-Prado S, Reinoso-Florez G, Sanchez-Hernandez A, Estrada-Villegas S, Lim B K, Guevara G. 2022. Bats and their vital ecosystem services: a global review. *Integrative Zoology*, **17** (1): 2–23.
- Rebelo H, Tarroso P, Jones G. 2010. Predicted impact of climate change on European bats in relation to their biogeographic patterns. *Global Change Biology*, **16** (2): 561–576.
- Riccucci M. 2012. Bats as materia medica: an ethnomedical review and implications for conservation. *Vespertilio*, **16**: 249–270.
- Rodríguez-San Pedro A, Allendes J L, Beltrán C A, Chaperon P N, Saldarriaga-Córdoba M M, Silva A X, Grez A A. 2020. Quantify-

- ing ecological and economic value of pest control services provided by bats in a vineyard landscape of central Chile. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **302**. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107063.
- Roeleke M, Schlgel U E, Gallagher C, Pufelski J, Blohm T, Nathan R, Toledo S, Jeltsch F, Voigt C C. 2022. Insectivorous bats form mobile sensory networks to optimize prey localization: The case of the common noctule bat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **119** (33). DOI: 10.1073/pnas.2203663119.
- Rojas D, Vale A, Ferrero V, Navarro L. 2011. When did plants become important to leaf-nosed bats? Diversification of feeding habits in the family Phyllostomidae. *Molecular Ecology*, **20** (10): 2217–2228.
- Sakoui S, Derdak R, Addoum B, Serrano-Delgado A, Soukri A, El Khalfi B. 2020. The life hidden inside caves: ecological and economic importance of bat guano. *International Journal of Ecology*, **2020** (1). DOI: 10.1155/2020/9872532.
- Saldaña-Vázquez R A, Castaño J H, Baldwin J, Pérez-Torres J. 2019. Does seed ingestion by bats enhance germination? A new meta-analysis 15 years later. *Mammal Review*, **49** (3): 201–209.
- Schleuning W D. 2002. Vampire bat plasminogen activator DSPA- α -1 (desmoteplase): a thrombolytic drug optimized by natural selection. *Pathophysiology of Haemostasis and Thrombosis*, **31** (3–6): 118–122.
- Sears K E, Behringer R R, Rasweiler J J, Niswander L A. 2006. Development of bat flight: morphologic and molecular evolution of bat wing digits. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103** (17): 6581–6586.
- Siepielski A M, Wang J, Prince G. 2014. Nonconsumptive predator-driven mortality causes natural selection on prey. *Evolution*, **68** (3): 696–704.
- Sothearn T, Furey N M, Jurgens J A. 2014. Effect of bat guano on the growth of five economically important plant species. *Journal of Tropical Agriculture*, **52** (2): 169–173.
- Stålhammar S, Pedersen E. 2017. Recreational cultural ecosystem services: How do people describe the value? *Ecosystem Services*, **26**: 1–9.
- Svensson G P, Skals N, Lofstedt C. 2003. Disruption of the odour-mediated mating behaviour of *Plodia interpunctella* using high-frequency sound. *Entomologia Experimentalis Et Applicata*, **106** (3): 187–192.
- Taylor P J, Grass I, Alberts A J, Joubert E, Tscharnke T. 2018. Economic value of bat predation services – A review and new estimates from macadamia orchards. *Ecosystem Services*, **30**: 372–381.
- Tremlett C J, Moore M, Chapman M A, Zamora-Gutierrez V, Peh K S H. 2020. Pollination by bats enhances both quality and yield of a major cash crop in Mexico. *Journal of Applied Ecology*, **57** (3): 450–459.
- Tuneu-Corral C, Puig-Montserrat X, Riba-Bertolin D, Russo D, Rebelo H, Cabeza M, Lopez-Baucells A. 2023. Pest suppression by bats and management strategies to favour it: a global review. *Biological Reviews*, **98** (5): 1564–1582.
- Vorontsov D D, Lapshin D N. 2002. Frequency tuning of the auditory system of acoustically active noctuids (noctuidae, lepidoptera). *Doklady Biological Sciences*, **386**: 407–409.
- Wang F, Pei X, Wu G, Bai Y. 2024a. Analysis and design of bat-like flapping-wing Aircraft. *Aerospace*, **11** (4): 325.
- Wang Q Y, Feng J, Wu H, Jiang T L. 2024b. Insectivorous bats provide more pest suppression services than disservices – a case study in China. *Biological Control*, **188**. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2023.105435.
- Wang X Y, Han X S, Csorba Gábor, Wu Y, Chen H Q, Zhao X, Dong Z Y, Yu W H, Lu Z. 2024c. A new species of Tube-nosed Bat (Chiroptera: Vespertilionidae: *Murina*) from Qinghai–Xizang Plateau, China. *Journal of Mammalogy*. DOI: 10.1093/jmammal/gyae104.
- Wanger T C, Darras K, Bumrungsri S, Tscharnke T, Klein A M. 2014. Bat pest control contributes to food security in Thailand. *Biological Conservation*, **171**: 220–223.
- Waters D A. 1996. The peripheral auditory characteristics of noctuid moths: Information encoding and endogenous noise. *Journal of Experimental Biology*, **199** (4): 857–868.
- Wiederholt R, Bagstad K J, McCracken G F, Diffendorfer J E, Loomis J B, Semmens D J, Russell A L, Sansone C, La Sharr K, Cryan P. 2017. Improving spatio-temporal benefit transfers for pest control by generalist predators in cotton in the southwestern US. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, **13** (1): 27–39.
- Wiederholt R, López-Hoffman L, Svancara C, McCracken G, Thogmartin W, Diffendorfer J E, Mattsson B, Bagstad K, Cryan P, Russell A, Semmens D, Medellín R A. 2015. Optimizing conservation strategies for Mexican free-tailed bats: a population viability and ecosystem services approach. *Biodiversity and Conservation*, **24** (1): 63–82.
- Wohlgemuth M J, Luo J, Moss C F. 2016. Three-dimensional auditory localization in the echolocating bat. *Current Opinion in Neurobiology*, **41**: 78–86.
- Yartsev M M, Ulanovsky N. 2013. Representation of three-dimensional space in the hippocampus of flying bats. *Science*, **340** (6130): 367–372.
- Yu W H, Csorba G, Wu Y. 2020. Tube-nosed variations-a new species of the genus (Chiroptera: Vespertilionidae) from China. *Zoological Research*, **41** (1): 70–77.
- Yu Y, Guan Z. 2015. Learning from bat: aerodynamics of actively morphing wing. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, **5** (1): 13–15.
- Zalipah M N, Anuar M S S, Jones G. 2016. The potential significance of nectar-feeding bats as pollinators in mangrove habitats of Peninsular Malaysia. *Biotropica*, **48** (4): 425–428.
- Zhang W J, Liu Y Y, Wang Z Q, Lin T T, Feng J, Jiang T L. 2023. Ef-

- fects of predation risks of bats on the growth, development, reproduction, and hormone levels of *Spodoptera litura*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **11**. DOI: 10.3389/fevo.2023.1126253.
- Zhang X, Wang W, Yu X, Liu Y, Li W, Yang H, Cui Y, Tian X. 2022. Biological composition analysis of a natural medicine, *Faeces Vespertilionis*, with complex sources using DNA metabarcoding. *Scientific Reports*, **12** (1). DOI: 10.1038/s41598-021-04387-1.
- Zhu D, Liu Y, Gong L, Si M, Wang Q, Feng J, Jiang T. 2024. The consumption and diversity variation responses of agricultural pests and their dietary niche differentiation in insectivorous bats. *Animals*, **14** (5). DOI: 10.3390/ani14050815.
- 刁海欣, 苏浩晖, 石子凡, 裴泉鑫, 黄秦, 于传庭, 李权, 余文华, 吴毅, 蒋学龙, 陈中正. 2024. 西藏地区两种蝙蝠新纪录: 安氏长舌果蝠和艾氏管鼻蝠. *兽类学报*, **44** (5): 558–562.
- 付子英, 唐佳, 陈其才. 2022. 蝙蝠, 听觉和回声定位研究的模型动物. *生物化学与生物物理进展*, **49** (5): 883–896.
- 白蛟蛟. 2018. 福文化中的蝙蝠纹样探究. *明日风尚*, **2018** (6): 342.
- 刘莹莹. 2024. 蝙蝠在农业生态系统中的害虫抑制作用及价值研究. 长春: 东北师范大学博士学位论文.
- 江廷磊, 赵华斌, 何彪, 张礼标, 罗金红, 刘颖, 孙克萍, 余文华, 吴毅, 冯江. 2020. 中国蝙蝠生物学研究进展及其保护对策. *兽类学报*, **40** (6): 539–559.
- 李灿, 周跃华. 2020. 夜明砂药材标准及炮制规范的现状及相关问题探讨. *中国新药杂志*, **29** (16): 1851–1855.
- 李典. 2006. 中国传统吉祥图典. 北京: 京华出版社.
- 吴涛, 龚小燕, 黄太福, 彭乐, 张佑祥, 刘志霄. 2018. 湘西州洞栖性蝙蝠物种多样性的初步调查. *野生动物学报*, **39** (4): 7.
- 张建鑫. 2019. 中国蝙蝠主题图案研究. 南京: 南京师范大学硕士学位论文.
- 陈又林, 李合胜. 2013. 民间传统建筑窗格装饰中的蝙蝠图案解析. *华东交通大学学报*, **30** (6): 5.
- 赵军. 2006. 动物在中西方文化中的不同内涵. *北京城市学院学报*, (4): 3.
- 耿江天, 王菲, 赵华斌. 2024. 城市化对中国蝙蝠影响的研究进展硕士学位论文. *生物多样性*, **32** (8): 19–31.
- 黄正澜懿. 2020. 榕江管鼻蝠分类地位有效性的探讨. 广州: 广州大学硕士学位论文.
- 黄泽锋, 廖雅晴, 王晓云, 张惠光, 蔡斌, 雍凡, 崔鹏, 余文华, 吴毅. 2023. 福建省两种管鼻蝠新纪录. *兽类学报*, **43** (4): 472–478.