

朱鹮野生种群保护管理现状与研究进展

曾键文¹ 王超¹ 牛克胜¹ 王浩锦² 徐向龙³ 叶元兴^{3*}

1 陕西汉中朱鹮国家级自然保护区管理局 汉中 723300; 2 北京林业大学国家公园学院 北京 100083;

3 北京林业大学生态与自然保护学院 北京 100083

摘要: 朱鹮 (*Nipponia nippon*) 是世界濒危鸟类, 我国国家一级重点保护野生动物。自 1981 年在陕西洋县重新发现朱鹮野生种群以来, 我国朱鹮保护取得了显著成效。截至 2023 年底, 朱鹮野生种群数量已由 1981 年的 7 只发展到 6 600 只, 活动范围覆盖陕西省汉中市全部辖区以及安康市、宝鸡市等地的部分县区, 并且相继在甘肃天水市和四川广元市出现活动记录。40 余年来, 朱鹮的保护随着种群的发展逐渐演化, 保护体系也变得日益完善。本文总结归纳了 40 多年来朱鹮野生种群现状及其保护管理体系, 包括当前朱鹮野生种群发展现状、主要保护管理措施、重要栖息地保护修复工程、种群监测、主要保护法规以及朱鹮研究进展, 并在此基础上进一步探讨了未来朱鹮野生种群及其栖息地保护和研究方向, 为朱鹮的保护和研究提供参考。

关键词: 濒危物种; 朱鹮; 野生种群; 保护生物学; 研究进展

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2026) 03-443-15

Conservation status and research advance for wild Crested Ibis

ZENG Jian-Wen¹ WANG Chao¹ NIU Ke-Sheng¹ WANG Hao-Jin²

XU Xiang-Long³ YE Yuan-Xing^{3*}

1 Shaanxi Hanzhong Crested Ibis National Nature Reserve Administration, Hanzhong 723300; 2 School of National Parks, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The Crested Ibis (*Nipponia nippon*) is one of the world's most endangered bird species and a first-class nationally protected wildlife species in China. Since the rediscovery of its wild population in Yangxian County, Shaanxi Province in 1981, significant achievements have been made in the conservation of this species in China. The conservation efforts have evolved alongside the growth of its population. This paper reviews the current status of *in situ* conservation of the Crested Ibis and research advances in recent decades, encompassing the expansion of the wild population, key conservation measures, critical habitat restoration projects, population dynamics monitoring, and related research progress. By the end of 2023, the wild population of Crested Ibises had increased from the initial 7 individuals in 1981 to approximately 6 600

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31900371, 32270550);

* 通信作者, E-mail: yeyuanxing@bjfu.edu.cn;

第一作者介绍 曾键文, 男, 硕士研究生; 研究方向: 野生动物保护, 自然保护区管理; E-mail: zengjian2825@163.com。

收稿日期: 2024-10-25, 修回日期: 2026-01-12 DOI: 10.13859/j.cjz.202624242 CSTR: 32109.14.cjz.202624242

individuals. Their distribution now fully covers the entire Hanzhong City, with recent sightings reported from Gansu Province and Sichuan Province. Significant progress has been achieved in research areas such as behavioral ecology, environmental adaptation and habitat utilization, molecular ecology and genetic diversity, as well as disease diagnosis and treatment. This work aims to explore future directions for the conservation of Crested Ibis populations and their habitats, and to provide a reference for advancing conservation strategies. The efforts and research on the Crested Ibis have been proven effective and remarkable. The conservation system has matured gradually, demonstrating a well-established framework. These findings will provide valuable insights for optimizing future conservation strategies.

Key words: Endangered species; Crested Ibis; Wild population; Conservation biology; Research advance

朱鹮 (*Nipponia nippon*), 是隶属于鹮形目 (PELECANIFORMES) 鹮科 (Threskiornithidae) 的中等体型涉禽 (郑光美 2023), IUCN 濒危等级 (Endangered, EN) 物种 (BirdLife International 2018), CITES 附录 I 物种 (CITES 2026), 国家一级重点保护野生动物。朱鹮曾广泛分布于东亚地区, 北达俄罗斯西伯利亚的海兰泡, 南至中国海南, 东到日本岩手县宫古海滨, 西至中国青藏高原东缘甘青交界处 (丁长青 2004, Ding 2010)。20 世纪中叶之后, 由于非法猎捕、栖息地丧失、环境污染等原因, 朱鹮野生种群数量锐减, 相继在俄罗斯、朝鲜半岛和日本野外绝迹, 一度被认为野外绝灭 (丁长青 2004)。1981 年 5 月, 中国科学院动物研究所刘荫增研究员带领考察队历时 3 年, 行程 5 万余公里, 在陕西省汉中市洋县八里关镇姚家沟发现了当时世界上仅存的 7 只野生朱鹮 (刘荫增 1981), 开启了中国朱鹮拯救的历程。

为了保护朱鹮, 我国政府和各级相关部门高度重视, 采取就地保护与易地保护相结合的保护模式, 并适时开展野化放归等保护措施。经过 40 余年的努力, 朱鹮野生种群数量突破 6 600 只, 其分布范围已扩散到陕西省外, 在甘肃天水 (赵洪峰等 2023) 和四川广元 (杨骏等 2025) 等地均有活动记录。此外, 我国在濒危物种保护方面一直践行“人类命运共同体”的理念, 不仅多次向其他国家赠送朱鹮种源, 还派出科研人员传授人工饲养繁育技术。先后帮

助日本和韩国建立朱鹮人工种群并成功实施再引入 (刘冬平等 2014), 朱鹮保护已经成为世界濒危物种保护的成功典范 (Coulter 2000)。

1981 年至 2000 年间, 朱鹮保护工作主要集中于个体监测层面, 包括栖息地蹲守巡护、人工投食和病伤个体救助等 (史东仇和曹永汉 2001)。自 2000 年以来, 随着朱鹮种群数量的逐渐恢复以及保护区的正式建立, 保护工作也从个体层面转向种群和栖息地并重的综合保护模式, 保护工作围绕种群动态监测、栖息地环境监测、栖息地林木监护、冬水田改造、病伤个体救护、社区扶持以及公众宣传等多维度开展, 逐渐形成了以“保护区 + 巡护员 + 农户”为核心的高效保护机制, 进一步发展为覆盖面更广、保护力度强度更高的“社区共管”保护模式 (丁长青和李峰 2005, 刘冬平 2014)。长期以来, 我国科技工作者围绕朱鹮的生物学特性、种群生态学、行为生态学和栖息地管理等方面开展了系统性的研究。研究内容涵盖朱鹮行为特征 (丁长青等 2004, Zou et al. 2024)、生活史策略 (张智和丁长青 2008, Xu et al. 2023)、种群数量动态与空间分布 (史东仇和曹永汉 2001, 王超等 2020a)、种群年龄结构和性别比例 (丁长青等 2004)、栖息地选择与利用模式 (张智和丁长青 2008, Huang et al. 2022)、领域行为 (史东仇和曹永汉 2001, 张智和丁长青 2008)、活动规律和扩散机制 (Hu et al. 2016, Ye et al. 2023)、疾病病理学 (邵乐乐等 2023, 张辉等 2023, Xie et al. 2024, Zhu et al.

2024)和遗传多样性(Kim et al. 2019)等方面,切实解决朱鹮保护的各种技术难题,为朱鹮的保护管理和野化放归工程提供了科学依据。

随着朱鹮种群不断壮大、气候变化对栖息地潜在的影响以及人为活动干扰的加剧,朱鹮保护面临新的挑战,保护管理和研究领域随之发生了显著的变化。因此,进一步凝练和总结40余年的中国朱鹮保护经验和技術体系,不仅对我国和朱鹮历史分布区国家的朱鹮保护和种群恢复具有重要指导价值,更是为世界濒危物种保护提供示范和成功的“中国方案”。

1 保护措施及成效

朱鹮的保护管理模式随种群动态、栖息地变迁和社会环境变化而不断调整。近年来,朱鹮种群不断增长,分布区显著扩散(Ye et al. 2023),其核心分布区从传统的山区(海拔700~1200 m)逐渐转移到汉江冲积平原(海拔450~600 m)(丁长青和李峰 2005,高岳芳 2010,Huang et al. 2022)。研究发现,朱鹮在繁殖期、游荡期和越冬期活动区域呈现高度重叠。同时,山区人口流失导致朱鹮栖息地退化(曾键文等 2021),朱鹮收容救助的数量逐年增加(庆保平等 2022a),出现集中营巢、在高压输电线铁塔上营巢等新现象(王超等 2020b)。与之相应,朱鹮野生种群的保护管理体系经历了显著发展过程,从主要依托“保护区+巡护员+农户”的多主体参与模式,现已逐步发展为“1+N”协同保护模式。在这一制度框架中,从原来保护区管理局为核心管理机构、保护区为重心,转变为由上级野生动物主管部门和保护区管理局作为朱鹮保护技术指导和关键问题攻坚队伍,以朱鹮活动分布区域内各县区野生动物主管部门为主体,负责各自县辖区内朱鹮保护各项措施的具体实施和保护政策的落实。在新形势、新架构下,通过将单一保护措施有机结合,逐步形成政策、规范和保护工程等协调一致、结构完整、系统高效的保护体系,加强对朱鹮分布区的保护并持续改善朱鹮栖息地质量(闫

鲁和黄治学 2021)。这种规范化的保护模式不仅提升了管理效能,而且推动了朱鹮保护的系统化发展,为朱鹮保护以及其他濒危物种保护提供重要参考,也充分展现了我国在濒危野生动物保护方面的领先优势。

1.1 栖息地保护

1.1.1 栖息地现状与管理措施 近20年来,朱鹮野生种群持续增长,其栖息地环境发生了显著的变化。朱鹮主要分布于陕南秦巴山区,该区域属于典型的人口外流型欠发达地区。随着生态移民工程政策的实施以及城市化进程的推进,大规模人口迁移,进而造成山区水田抛荒,加上山区农民耕作方式发生转变,由传统的一季水稻种植转变为两季水旱轮作模式,这些变化直接导致朱鹮野生种群在中低山区的觅食地质量大幅下降、退化甚至丧失(曾键文等 2017,张亢敏楠 2023)。此外,受种群内部密度制约的影响(朱梦 2020,Ye et al. 2023),朱鹮种群也在不断扩散。然而,保护区管理局对朱鹮保护区外无管辖权,管理措施实施受到限制,部分扩散区的朱鹮巢区和夜宿地存在被干扰,甚至出现砍伐的现象。同时,保护区在监测巡护过程中,还发现部分扩散区觅食地存在污染等问题(Liu et al. 2019,Yang et al. 2024a)。这些因素导致当前朱鹮栖息地保护面临严峻挑战。为应对朱鹮种群动态变化以及环境条件的改变,保护区实施了朱鹮栖息地退化湿地修复、冬水田保育、重要栖息地林木保护与社区共管相结合的措施进行朱鹮栖息地保护,以扩大朱鹮栖息地面积,提升朱鹮栖息地环境质量,保障现阶段朱鹮生存和发展安全(咎林森 2023,苏凯文等 2024)。

1.1.2 栖息地湿地修复工程 保护区结合当地土地管理政策,通过开垦荒芜和退化农田、实施冬水田保护等方式恢复人工湿地(咎林森 2023)。采用有机种植和养殖结合的模式,推进综合种养以改良土壤结构,逐步提升水田基底肥力(郭向荣和温亚利 2012)。同时,还实施稻田留白、优化农田水利设施等措施,为朱鹮

在水田区域的活动提供更充足空间。此外,通过投放泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*)、鱼苗等朱鹮取食的本地水生和底栖动物,有效修复水田湿地生态系统的生物多样性。这些措施不仅缓解了农田荒芜和湿地生态功能下降等问题,扩大了朱鹮的可觅食湿地范围,稳定了丘陵和低山地区朱鹮种群活动,同时也通过撂荒地复垦促进了区域经济发展与社会和谐(郭向荣和温亚利 2012, 段伟等 2013, Yang et al. 2024b)。此外,保护区还通过河道疏通、水生植被种植与增殖放流等生态修复手段,配合围栏设置、警示标识和定期巡护等管理措施,减少放牧、开垦等人为活动对湿地的干扰。这些保护行动不仅扩大了河道湿地面积、增强了泄洪能力,还有助于恢复河滩的基底结构、水文条件、土壤特性及生物群落组成。通过控制人类干扰,促进河滩湿地自然演替,逐步恢复其作为朱鹮栖息地的生态功能,从而有效增加朱鹮河滩觅食地(彭少麟等 2020)。近年来,保护区还通过“鹮田一分”退化湿地修复工程及湿地保护恢复补助项目等一系列生态修复工程,在关帝、溢水、谢村、纸坊、戚氏、洋州、华阳和龙亭等朱鹮重点活动区,累计修复各类退化湿地 373.33 hm² (咎林森 2023)。

1.1.3 冬水田保育保护工程 稻田冬季蓄水有助于提升稻田动物群落多样性,从而为朱鹮提供优质觅食栖息地(曾键文等 2021, Nakanishi et al. 2025)。针对稻田等人工湿地生态系统,提倡并推广一季种植模式,结合秋、冬、春三季蓄水保育措施,形成冬水田觅食地保护模式(郭向荣和温亚利 2012, 闫鲁和黄治学 2021)。冬水田保育工程主要在具备稳定水源条件和群众基础良好的朱鹮重点活动分布区大规模实施,通常由保护区管理局主导、鼓励群众自发组织和自愿参与。在实施的过程中,通过向土地承包人和参与群众支付报酬,保障其经济利益,提升群众在土地经营中的收入水平,充分体现朱鹮保护“共建、共管、共享、共同受益”的理念(孙博等 2017)。近年来,

在保护区及周边的洋县黄安、磨子桥、黄家营、槐树关等地,累计保育冬水田达 1 000 hm² (咎林森 2023),这一措施为朱鹮种群越冬和繁殖提供了稳定觅食场所和适宜的生态环境。

1.1.4 重点栖息地林木保护 采取挂牌管理与社区共管相结合的保护模式(丁长青 2005, 张智等 2008),并采用补偿与鼓励相结合的方式,对朱鹮大型稳定夜宿地的林木进行保护管理,设立警示宣传牌,登记造册、严格保护,与夜宿地林地林木所有权人或承包人签订共管协议。在此基础上,构建由保护区巡护员定期巡护、社区信息员常态监管以及林地所有者主动维护的共管机制,形成对朱鹮夜宿地的协同保护体系(刘冬平等 2014, 咎林森 2023)。针对重点地区朱鹮繁殖地的保护,采取引导与激励相结合的动态管理方式,对当年朱鹮繁殖成功的林木所有人实施奖励措施(孙博等 2017),让社区合作社及群众成为朱鹮保护的直接受益者(段伟等 2013, Ma et al. 2024),从而引导其主动参与朱鹮繁殖地的保护工作及其繁殖活动的动态监测。这一机制有效减少了对朱鹮繁殖及夜宿地林木的干扰和破坏,确保朱鹮繁殖期的安全和栖息地的稳定(刘冬平等 2014)。截至 2023 年底,通过挂牌保护和社区共管相结合的模式,已成功保护朱鹮大型稳定夜宿地 30 处,共管保护朱鹮营巢树近 4 000 株。

1.2 种群动态监测

朱鹮野生种群动态的监测采用每年定期两次的调查模式,包括春季繁殖调查和秋季种群数量同步调查。繁殖调查在每年 2~6 月开展,基于朱鹮以出生扩散为主、具有巢址忠实度高的生物学习性(史东仇和曹永汉 2001, Ye et al. 2023),通过保护区巡护、社区走访踏查、媒体公告、宣传海报以及公众参与监测等方式收集和确认营巢地信息,并开展持续性的朱鹮营巢、产卵、孵化、育雏、幼鸟环志、出飞和出飞后幼鸟活动等监测工作(王超等 2020a, b)。秋季种群数量同步调查在每年 9 和 10 月开展,利用朱鹮集群夜宿的生态习性,通过巡护监测、

信息征集和卫星定位相结合的方法确定种群主要活动区、夜宿位置和集群情况 (Liu et al. 2018, 王超等 2020a, 李欣悦等 2023), 采用同步调查的方法对所有集群夜宿地进行全面普查, 统计调查区域内朱鹮夜宿地分布状况及种群数量。这一长期系统的监测体系为朱鹮种群动态研究提供了可靠的基础数据支撑 (曾键文等 2018)。

自 1981 年重新发现 7 只朱鹮的野生种群以来, 朱鹮种群数量稳步增长, 2012 年达到了 1 100~1 200 只 (王超等 2014)。根据 2023 年野生朱鹮种群数量同步调查, 野生种群数量超过 6 600 只 (图 1)。

朱鹮野生种群主要分布在陕西南部的汉中和安康两市, 活动范围覆盖汉中市管辖的所有县区, 以及宝鸡、安康和商洛等市的部分县区, 总面积超 1.6 万 km² (胡灿实 2016, 王超等 2020a, 曾键文等 2021)。此外, 甘肃省天水市 (赵洪峰等 2024) 和四川省广元市 (杨骏等 2025) 相继报道了野生朱鹮分布。目前, 其活动范围覆盖 3 省 7 市 26 县区。

1.3 天敌防控

朱鹮的主要天敌是猛禽、蛇类以及鼬科动物和鼯鼠 (*Pteromyini* spp.) 等 (Jiang et al.

2023)。其中, 猛禽包括普通鵟 (*Buteo japonicus*)、鹰雕 (*Nisaetus nipalensis*)、游隼 (*Falco peregrinus*)、白腹鹞 (*Circus spilonotus*) 等, 主要威胁朱鹮成体、亚成体和幼鸟。小型猛禽, 如红隼 (*F. tinnunculus*) 和赤腹鹰等 (*Accipiter soloensis*), 以及蛇类、黄鼬 (*Mustela sibirica*) 和鼯鼠则主要捕食朱鹮幼鸟和卵。针对不同天敌, 采取分级防控策略, 针对猛禽和鼯鼠等来自天空的威胁, 主要通过蹲守式保护保障朱鹮的生存和繁殖安全; 对于蛇和鼬等来自地面的危险, 主要通过在营巢和夜宿树木树干上安装障碍物和包裹涂油的塑料布等措施进行防范, 取得了良好的防控效果。此外, 还可以在朱鹮的重要活动分布区和重要栖息地增加巡护频率和监测强度, 强化社区共管机制等方式控制天敌的危害 (Jiang et al. 2023)。

1.4 病伤个体救护

保护区自 1981 年重新发现朱鹮以来 (刘荫增 1981), 一直开展野生朱鹮病伤个体的救护工作 (庆保平等 2022a)。这些救护个体对于野生种群的恢复、朱鹮人工种群的建立和易地保护起到重要作用。目前, 保护区已经建立了一套完整的技术规范体系 (陕西省市场监督管理局 2023, 全国野生动物保护管理与经营利用标

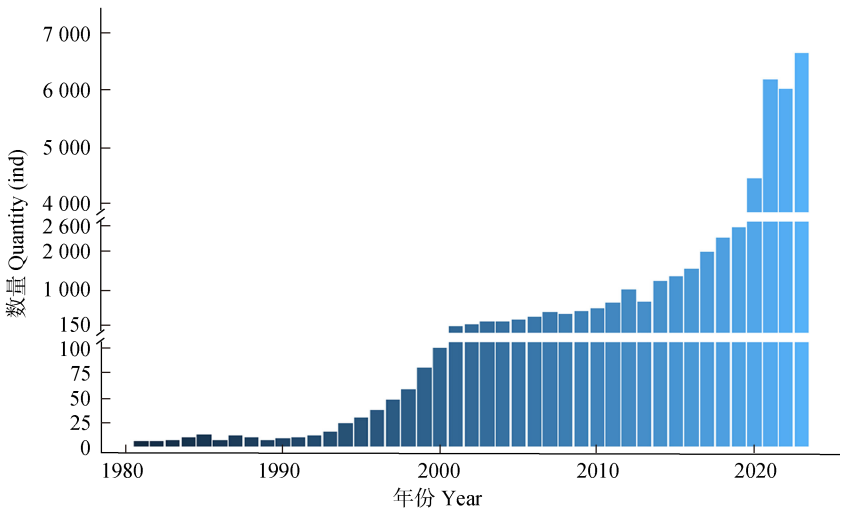


图 1 朱鹮 (*Nipponia nippon*) 野生种群数量增长 (1981—2023 年)
Fig. 1 Population growth of wild Crested Ibis (1981–2023)

准化技术委员会 2024), 该体系全面覆盖了朱鹮救治信息接收, 巡护员迅速响应并实施现场收容与救护处理。为保障朱鹮的救护、运输及安全保障, 保护区设计了专用的箱笼(王超等 2022c), 以确保病伤个体能够获得及时、专业且高效的收容与救治; 针对不同伤病的朱鹮, 保护区采用了针对性的治疗方案; 对于治愈康复后具备野外生存能力的个体, 选择在救助地点附近的适宜地点放归野外。近十年来, 累计救助治疗病伤朱鹮 1 500 余只, 平均每年收容数量占当年野生种群的 4.25%, 治愈放归个体数占救助个体总数比例达到 52.8%, 保障了朱鹮的生存安全和种群的稳定发展(庆保平等 2021, 王斌等 2021, 庆保平等 2022a, b)。

1.5 常见疾病与防治

目前, 朱鹮野生种群尚未发生因大规模细菌感染导致的致病和死亡事件。由于发病个体随机、时间分散, 疾病防治以个体救护和特定药物治疗为主。朱鹮已知的疾病主要包括细菌感染、寄生虫病和外伤。细菌感染包括大肠杆菌(*Escherichia coli*)、沙门氏菌(*Salmonella* spp.) 和绿脓杆菌(*Pseudomonas aeruginosa*) 等(王斌等 2021, 庆保平等 2022a, b, c), 感染个体通过病原敏感抗生素、补液和促消化等治疗方案, 并通过用二氧化氯等消毒剂对污染水体、土壤净化杀菌进行防控。寄生虫感染包括棘口吸虫(*Echinostoma* sp.)、扁弯口吸虫(*Clinostomum complanatum*) 及胃瘤线虫(*Eustrongylides* sp.) 等, 与朱鹮取食泥鳅及田螺等食物密切相关, 主要使用左旋咪唑、阿苯达唑和伊维菌素等驱虫药进行防治。外伤和骨折也是朱鹮收容救助常见伤病, 占收容救助个体比例的 17% 左右, 主要采用消毒、清创、缝合、接骨甚至截肢等治疗方案(庆保平等 2022a, b)。

1.6 相关政策法规

朱鹮被重新发现后, 相关行政管理部门出台了一系列保护管理政策文件。国家林业和草原局(原国家林草局)、陕西省林业局(原陕西

省林业厅)、陕西省生态环境厅(原陕西省环境保护局)和洋县人民政府先后印发《关于认真保护世界珍禽朱鹮的紧急通知》《关于保护朱鹮的通知》《关于加强朱鹮保护、调查、科研工作的通知》等文件(王永生等 2021), 要求切实加强朱鹮繁殖、栖息环境的保护管理工作, 严格禁止在朱鹮分布区进行猎捕、营巢树砍伐、农药化肥使用、投毒捕鱼等人为干扰活动。同时, 政策还要求相关部门在重点地区开展系统巡护和监测, 并且加强保护管理、科学研究和公众宣传教育等工作, 形成了完善的政策保护体系(咎林森 2023)。

1983 年 4 月, 国务院颁布《关于严格保护珍贵稀有野生动物的通令》, 首次将朱鹮列为国家珍稀濒危野生动物, 确立其法定保护地位。2007 年, 陕西汉中朱鹮国家级自然保护区的建立标志着朱鹮保护体系基本形成。该体系以自然保护区为核心, 依托分布区各县区野生动物管理机构、信息员和社区群众为主体构建而成(刘冬平等 2014)。随着全国各地野化放归项目的实施, 保护主体进一步多元化, 湿地公园、湿地保护区、野化放归基地以及非政府组织机构等新型保护主体相继加入保护网络(黎佳易 2023, 王华强等 2024)。2021 年, 朱鹮被列为《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》抢救性保护珍稀濒危野生动物的 12 个旗舰种之一, 同时也是 15 种珍稀濒危野生动物野化放归关键种之一。2022 年, 陕西省林业局印发《关于切实加强朱鹮保护管理的通知》(陕林动〔2022〕470 号), 明确要求朱鹮活动分布区市县各级林业主管部门落实属地管理责任, 通过林长制建立巡护监测队伍, 完善经费保障机制, 建设保护站点, 并加强生态修复和宣教保护。《国务院规定行政许可审批机关的物种范围》(国家林业局公告〔2017〕14 号)进一步明确将朱鹮等 10 种国家重点保护陆生野生动物保护与利用审批事项由国家林业和草原局负责。这一系列制度创新与政策优化为朱鹮保护管理提供了强力的制度保障。朱鹮活动分布区各地运用朱鹮这一

生态名片的辐射作用，带动朱鹮野生种群分布区以及周边地区生态环境质量提升，促进了当地居民的保护意识以及以朱鹮为主题的生态旅游发展，通过朱鹮文化带动社会效益和经济效益，仅洋县一地“十三五”期间朱鹮生态有机产品品牌价值超过 70 亿元（韩沁珂 2019）。

1.7 其他保护措施

1.7.1 人工投食 为解决朱鹮越冬期和繁殖期遭遇恶劣气候、食物匮乏而引起的觅食困难问题，在朱鹮重点活动区开展冬水田泥鳅和鱼苗投放以及湿地增殖放流等措施，提高朱鹮栖息地质量（史东仇和曹永汉 2001，曾键文等 2017）。

1.7.2 定期巡护与监测 在朱鹮重点活动区和核心栖息地设立固定巡护样地，开展定期巡护和专项巡查。结合常态化监测、公众宣传等手段，及时收集朱鹮相关信息，发现并消除威胁朱鹮生存的隐患（咎林森 2023）。

1.7.3 构建社区共管体系 当前，在朱鹮主要活动区构建了以保护区为主导、社区群众共同参与的共建共管模式。在朱鹮扩散区，各县区野生动物主管部门发展基层信息员，引导鼓励群众主动报告朱鹮活动和异常信息；同时，依托社区居民或地方合作社的优势，通过协作机制纳入朱鹮保护体系，最终形成多方协同、系统整合的保护网络（丁长青 2005，Ma et al. 2024）。

1.7.4 保护宣教 从 1981 年开始，陕西省将每年 4 月 11~17 日确定为“爱鸟周”，9 月为“野生动物保护宣传月”，以朱鹮为主题的各类生态体验、自然教育、媒体宣传和艺术创作有效地提高了公众对朱鹮的认知和对朱鹮保护重要性的认同，为朱鹮及其他野生动物的保护奠定了广泛的群众基础，形成了深刻的社会影响力（Yang et al. 2022）。

1.7.5 建设高铁防护网 由于西成高铁穿越洋县 29.8 km，经过朱鹮部分活动区，为了避免朱鹮碰撞风险，保护区协同建设方在朱鹮密集活动分布区高铁线路两侧 34 处加装 33 km

防护网，网格控制在 3 cm × 3 cm，内侧安装黄色反光条，保障朱鹮的生存和高速列车运行的安全（张洪峰等 2017，Hu et al. 2020）。

2 研究进展

近年来，对朱鹮的研究在栖息地选择、繁殖生态、行为与适应、遗传进化、种群动态和栖息地保护管理等多个方面取得了显著成果。

2.1 栖息地选择

朱鹮栖息地选择对于朱鹮种群恢复至关重要。水田是朱鹮重要的觅食地，研究表明，冬水田的减少直接抑制朱鹮的营巢数量（Sun et al. 2015）。Li 等（2022）进一步指出，水田和水体（河流、湖泊和池塘）及其相互作用对朱鹮巢址选择的贡献最大。随着朱鹮种群的扩大，平原地区的朱鹮对冬水田面积的依赖性降低，而微生境特征（如土壤松软度）变得更为重要（Hu et al. 2016）。稳定同位素分析表明，繁殖前期山区栖息地的食物资源状况更好，而平原地区的优质觅食地不足（Xu et al. 2022）。

在巢址选择上，朱鹮在山区主要选择马尾松（*Pinus massoniana*），而扩散到平原地区后，则倾向于选择更大的榆树（*Ulmus pumila*）和山杨（*Populus davidiana*）（Huang et al. 2022）。同时，巢址选择还受到人为活动的影响，主动回避高等级公路（张慧等 2017），并且逐渐靠近居民区营巢（Ma et al. 2021）。

在栖息地模型分析上，Sun 等（2016）基于生态位模型预测，未来 50 年内朱鹮的种群数量和分布范围可能增加，但繁殖成效和扩散距离仍是主要限制因素，种群将集中于局部区域。另外，季节性降水量也会影响其分布格局（陈枫楠等 2024）。在当前气候条件下，朱鹮的最适宜栖息地主要集中分布在陕西、四川、湖北、河南和甘肃等地（夏卓异等 2023）。此外，气候和土地利用变化导致朱鹮与其伴生鸟类，如苍鹭（*Ardea cinerea*）和白鹭（*Egretta garzetta*）等的生态位重叠度增加（Tuohetahong et al. 2024），揭示了在保护朱鹮的同时，还应关注其

伴生鸟类的栖息地保护,以促进生态系统的整体平衡。

2.2 繁殖生态

朱鹮作为典型的异步孵化鸟类,其窝卵数随着繁殖日期的推移呈现显著降低以及首枚卵的性别表现出明显偏雌现象(杜枫林 2020)。Song 等(2019)的研究证实,先孵化的个体在体重和体型上具有显著优势,表现出更高的存活率和终生适合度,这一发现支持了银勺效应假说(silver spoon hypothesis)。Xu 等(2023)基于长期繁殖数据分析进一步揭示,当窝雏数为 3 时,雏鸟质量和后代适合度达到最高。根据近些年的监测,朱鹮出现在铁塔上的营巢的情况。相比树巢,铁塔巢具有更高的繁殖成效(王超等 2020b)。这些研究结果为深入理解朱鹮的繁殖策略提供了重要的科学依据。

2.3 行为适应

Ye 等(2017)研究发现,随着朱鹮群体规模的增加,其觅食时间占比显著上升,而警戒时间占比则显著下降,同时惊飞距离也显著降低,验证了稀释效应假说(risk dilution hypothesis)。研究进一步发现,在与白鹭混合群中,朱鹮惊飞距离显著增大,表明朱鹮能够有效利用白鹭的反捕食者信号增强其天敌防御能力(Ye et al. 2017)。Ye 等(2023)的研究证实,朱鹮的扩散模式以出生扩散为主,且繁殖密度是驱动其出生扩散的主要驱动因素。Zou 等(2024)的最新研究表明,扩散至平原地区的朱鹮个体与山区种群相比,表现出更短的惊飞距离,对人类活动的耐受性更高。

2.4 智慧化监测

近年来,人工智能和机器学习的快速发展为濒危物种的智慧化监测提供了新的范式,在野生朱鹮研究中也进行了尝试。Zhao 等(2023)通过机器学习和聚类的方法,构建了野生种群的被动声学个体识别监测技术,个体识别准确率达 85%。针对野外复杂环境下朱鹮的图像识别问题, Huang 等(2024)通过改进 YOLOv7-tiny 架构,开发了在雨雾天气的深度

学习模型,该模型采用 RainMix 数据增强策略与高效混合注意力机制(E-SEWSA),在雨天对朱鹮图片识别准确率提高了 23.6%。Jiang 等(2022)提出的改进时空 DBSCAN 算法,通过整合轨迹数据的时空密度特征和生境遥感参数,实现了朱鹮夜宿地和觅食地的自动判别。

2.5 分子生物学

近年来,针对朱鹮的分子生物学研究揭示了朱鹮相关的遗传适应机制(表 1)。Wang 等(2022a)通过比较基因组学分析发现,触觉性取食的朱鹮听觉系统基因通路显著富集上调,而视觉发育相关的基因缺失和突变被积极选择或发生保守氨基酸替代现象。进一步研究表明,朱鹮 β -防御素基因家族通过外显子融合(2~4 个外显子)及选择性剪接形成多样化变体,外显子融合和选择性剪接是朱鹮防御素进化和先天免疫表达的重要调控机制(Lan et al. 2014)。染色体水平基因组组装显示,朱鹮存在微染色体融合现象,揭示了与红原鸡(*Gallus gallus*) 7 和 8 号同源的染色体融合是潜在的朱鹮细胞遗传学特征(Wang et al. 2022)。Xu 等(2024)绘制的朱鹮染色体水平的基因组图谱,鉴定出由 22 号常染色体和古老性染色体融合形成的新性染色体,并发现雌性特异性表达基因在生殖调控中具有关键作用。

在遗传多样性研究中, Kim 等(2019)进行了朱鹮线粒体全基因组测序,核苷酸对偏 A + T(占比为 53.79%),基于最大似然法和贝叶斯法的系统发育关系分析显示,朱鹮属于鸛形目鸛科的独立演化分支。Choi 等(2020)通过微卫星标记技术、基因微卫星多样性分析、主坐标分析和遗传结构分析发现,朱鹮基因观察杂合度均值为 0.84,可以分为两个遗传类群。Feng 等(2019)收集了古今朱鹮的样本,发现现代朱鹮失去了一半的历史群体遗传多样性,由于长期近亲繁殖,积累了较高的有害突变。Fu 等(2019)的进一步研究还发现了一些与胚胎发育和雏鸟存活相关的基因,这些基因的功能缺失或异常表达可能导致发育异常或死亡,

表 1 朱鹮（*Nipponia nippon*）的分子生物学研究进展

Table 1 Research progress in molecular biology of the Crested Ibis

研究领域 Research focus	关键发现 Key findings	重要意义 Implications	参考文献 References
感觉系统演化 Sensory system evolution	听觉通路基因上调；视觉发育相关基因发生缺失、突变或保守替代 Upregulation of auditory pathway genes; deletion, mutation, or conservative substitution of vision development-related genes	适应触觉取食，视觉功能可能发生特化 Adapting to tactile feeding, and the visual function may become specialized	Wang et al. 2022a
免疫系统演化 Immune system evolution	β -防御素基因家族通过外显子融合与选择性剪接形成多样化变体 The β -defensin gene family generates diverse variants through exon fusion and alternative splicing	先天免疫调节的重要机制 Key mechanisms underlying the regulation of innate immunity	Lan et al. 2014
染色体演化 Chromosome evolution	存在微染色体融合现象；由 22 号常染色体与古老性染色体融合形成新性染色体 Evidence of microchromosome fusion is observed, with a novel sex chromosome resulting from the fusion of autosome 22 and an ancestral sex chromosome	提供细胞遗传学标志；性染色体演化新案例 The provision of cytogenetic markers constitutes a novel case of sex chromosome evolution	Xu et al. 2024
遗传多样性 Genetic diversity	线粒体基因组 A + T 占比高（53.79%）；微卫星分析显示可分为两个遗传类群；现代种群丧失约一半历史遗传多样性，积累较多有害突变 The mitochondrial genome exhibits -high A + T content (53.79%); microsatellite analysis reveals the presence of two distinct genetic clusters; and the modern population has lost approximately half of its historical genetic diversity while accumulating a substantial number of deleterious mutations	揭示系统发育地位与现存种群遗传结构，反映瓶颈效应与近交风险 Determination of the phylogenetic placement and extant population genetic structure serves to illuminate bottleneck signatures and inbreeding vulnerability	Kim et al. 2019 Choi et al. 2020 Feng et al. 2019
繁殖相关基因 Reproductive genes	某些胚胎发育与雏鸟存活相关基因功能缺失或异常表达可能导致繁殖失败 Reproductive failure may arise from loss-of-function or misregulation of genes critical for embryonic development and chick survival	从分子层面解释部分繁殖失败 Molecular-level explanation of certain reproductive failures	Fu et al. 2019
羽色相关基因 Plumage coloration genes	真黑素与朱鹮的色素代谢无关 Eumelanin is unrelated to pigment metabolism in the Crested Ibis	理解羽毛白化 Mechanisms of feather whitening in the Crested Ibis	Yang et al. 2015
多巴胺受体基因 Dopamine receptor genes	该基因的多态性可能影响警戒行为 Genetic polymorphism at this locus may affect vigilance behavior	理解朱鹮警戒行为的机制 Understanding the vigilance behavior mechanism of the Crested Ibis	Komatsu et al. 2014

进而导致朱鹮繁殖失败。今后对朱鹮的保护工作需要同分子遗传学更好地结合，以高效避免近亲交配，增加重要基因的遗传多态性。

在朱鹮表型变异上，Yang 等（2015）报道了部分朱鹮个体出现羽毛白化性状，对真黑素等黑色素基因表达水平的检测分析表明，真黑素与朱鹮的色素代谢无关。Komatsu 等（2014）解析了与朱鹮警戒行为调控相关的多巴胺受体基因结构，其多态性及其与朱鹮特定行为的关

系尚不清楚。此外，基于粪便 DNA 的无损伤性别鉴定技术（张漫慧等 2020）及同位素示踪法的营养策略分析（He et al. 2013）为朱鹮研究提供了新工具。

这些研究对理解朱鹮在基因组层面表现出与其生态适应、免疫防御和繁殖生活史相关的特殊演化轨迹具有重要意义。当前朱鹮种群遗传多样性较低，有害突变积累，有必要将分子遗传信息纳入保护实践，科学配对避免近交，

提升关键基因的遗传多态性, 以支持朱鹮种群的长期发展。

3 存在问题及展望

40 多年来, 朱鹮这一人类伴生鸟种群持续良性发展(郭向荣和温亚利 2012), 被誉为“拯救濒危物种成功的典范”, 得到了国内外学术界和保护组织的高度评价。目前朱鹮数量发展虽然势头良好, 但是我们还需要清醒地认识到, 朱鹮的现状仍不容盲目乐观。

首先, 当前朱鹮野生种群扩散现象非常明显, 这给传统的、基于固定区域的保护地与监管体系带来了巨大冲击, 迫切需要制定针对朱鹮保护的天然保护地规划, 积极探索创新保护模式, 提升保护区保护力度(叶元兴 2018)。其次, 朱鹮分布区多为社会经济欠发达地区, 保护工作与地方发展仍然存在矛盾, 单纯依赖“经济补偿”的社区参与模式难以持续发展, 亟待探索基于生态产业的社区绿色发展路径, 实现保护与发展的协同。再次, 现有种群是由 1981 年发现的 7 只朱鹮中发展起来的极小种群(Li et al. 2014), 遗传多样性低, 积累较多有害遗传突变, 种群非常脆弱(Feng et al. 2019, Fu et al. 2019)。近年来, 尽管我国已在河南、浙江、河北及山东等多地建立了野化训练基地, 并且在河南董寨、浙江德清和江苏盐城等地开展了野化放归试验并取得初步成效, 但目前野化放归种群仍然存在技术瓶颈, 缺乏全国性的工程规划与技术规程指导, 在一定程度上限制了种群重建的科学性与成效。

面向未来, 朱鹮保护的成功有赖于在巩固现有的“政府主导、科技支撑、社区参与”综合保护模式基础上(Toyoda 2017, Ren et al. 2022), 进一步推进保护实践与科学研究的深度融合(张引等 2020, Kawashima et al. 2023)。未来的保护应以社区共管为基础框架, 核心任务是加强朱鹮种群动态监测与栖息地修复。通过发展智慧生态农林、打造“朱鹮”生态品牌等多元化生态价值实现途径, 构建可持续发展

的人鸟和谐共生系统(Maharjan et al. 2022, Yang et al. 2024b)。目标是率先在朱鹮重点分布区建立人与自然和谐共生的朱鹮示范小区, 并逐步由点到面向广大朱鹮扩散区推广(Uenishi 2019)。同时, 需要充分发挥“朱鹮保护国家创新联盟”和“朱鹮国家保护研究中心”的统筹作用, 系统编制朱鹮保护工程规划, 攻克技术瓶颈, 科学推进朱鹮种群发展。

在科学研究上, 朱鹮作为遗传背景清晰、保护历史完整的东亚特有珍稀鸟类, 是开展保护生物学、生态学乃至环境社会学研究的理想“模式物种”。未来应该重点围绕朱鹮栖息地需求、繁殖生物学、保护生物学以及野化放飞等方面开展科学研究; 利用基因组学等工具深入解析其低遗传多样性的长期影响与适应性进化潜力; 借助信息技术、人工智能与生态学的交叉融合(Xie et al. 2020, Xu et al. 2024), 发展从个体、种群到生态系统层次的全方位动态监测与健康评价新方法体系, 继续为朱鹮保护和种群稳定发展提供理论和技术支持。通过保护与研究的深度互动与成果转化, 最终将朱鹮保护打造成全球濒危物种保护与生态文明建设的科学范例, 为引领全球朱鹮及濒危物种保护贡献“中国智慧”、提供“中国方案”。

参 考 文 献

- BirdLife International. 2018. *Nipponia nippon*. The IUCN red list of threatened species 2018: e.T22697548A132069229. [EB/OL]. [2026-04-18]. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T22697548A132069229.en>.
- Choi H E, Kim G, Baek Y S, et al. 2020. Development and characterization, and application of ten polymorphic microsatellite markers in the Crested Ibis *Nipponia nippon* from South Korea. *Animal Systematics Evolution and Diversity*, 36(2): 154–158.
- CITES. 2026. Appendices I, II and III. [EB/OL]. [2026-04-18]. <https://cites.org/eng/app/appendices.php>.
- Coulter M. 2000. Conservation status of Ibis // 中国野生动物保护协会, 中国鸟类学会, 陕西省野生动物保护协会. 稀世珍禽

- 朱鹮：99 国际朱鹮保护研讨会文集。北京：中国林业出版社，219–222。[Coulter M. 2000. Conservation status of Ibis // China Wildlife Conservation Association, China Ornithological Society, Shaanxi Wildlife Conservation Association. Rare and Precious Bird—The Crested Ibis: Proceedings of the 1999 International Crested Ibis Conservation Symposium. Beijing: China Forestry Publishing House, 219–222.]
- Ding C Q. 2010. Crested Ibis. Chinese Birds, 1(2): 156–162.
- Feng S H, Fang Q, Barnett R, et al. 2019. The genomic footprints of the fall and recovery of the Crested Ibis. Current Biology, 29(2): 340–349.
- Fu C Z, Guang X M, Wan Q H, et al. 2019. Genome resequencing reveals congenital causes of embryo and nestling death in Crested Ibis (*Nipponia nippon*). Genome Biology & Evolution, 11(8): 2125–2135.
- He X L, Qing B P, Han J L, et al. 2013. Improved molecular assay for sex identification of the endangered Crested Ibis (*Nipponia nippon*) based on the *CHD1* gene and a sex-linked microsatellite locus. Zoological Science, 30: 742–747.
- Hu C S, Song X, Ding C Q, et al. 2016. The size of winter-flooded paddy fields no longer limits the foraging habitat use of the endangered Crested Ibis (*Nipponia nippon*) in winter. Zoological Science, 33(4): 345–351.
- Hu H, Tang J Q, Wang Y, et al. 2020. Evaluating bird collision risk of a high-speed railway for the Crested Ibis. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 87, 102533.
- Huang J L, Zhang P C, Zhang J J, et al. 2024. A study of rainy ibis detection based on YOLOv7-tiny. Journal of Mechatronics & Artificial Intelligence in Engineering, 5(1): 100–114.
- Huang Y J, Ye Y X, Zhang Y Z, et al. 2022. Tall trees drive the nest-site selection of wild Crested Ibis (*Nipponia nippon*). Bird Conservation International, 32(3):486–497.
- Jiang N, Wu S, Tong Y W, et al. 2023. The impact of predation on population dynamics of the Crested Ibis in the Qinling Mountains, Shaanxi, central China. Restoration Ecology, 31(3): e13741.
- Jiang X, Yang T D, Liu D P, et al. 2022. An automatic identification method of Crested Ibis (*Nipponia nippon*) habitat based on spatiotemporal density detection. Animals, 12(17), 2220.
- Kawashima H, Fukahori K, Parveen M, et al. 2023. Citizen's perception on eco-friendly lifestyle for conserving endangered Oriental White Stork and Crested Ibis bird species in Japan case studies in Toyoka, Sado and Konosu cities. International Journal of Built Environment & Sustainability, 10(3): 67–79.
- Kim G, Jeong C K, Choi H E, et al. 2019. The complete mitochondrial genome of an Asian Crested Ibis *Nipponia nippon* (Pelecaniformes, Threskiornithidae) from South Korea. Mitochondrial DNA Part B Resources, 4(2): 3707–3708.
- Komatsu Y, Yamashita M, Yamada T, et al. 2014. The nucleotide sequences for the dopamine receptor D4 gene in the Japanese Crested Ibis. The Journal of Animal Genetics, 42(1): 3–9.
- Lan H, Chen H, Chen L C, et al. 2014. The first report of a Pelecaniformes defensin cluster: characterization of β -defensin genes in the Crested Ibis based on BAC libraries. Scientific Reports, 4: 6923.
- Li S B, Li B, Cheng C, et al. 2014. Genomic signatures of near-extinction and rebirth of the Crested Ibis and other endangered bird species. Genome Biology, 15(12): 557–572.
- Li X H, Fu J Y, Zhai T Q, et al. 2022. Understanding recovery is as important as understanding decline: the case of the Crested Ibis in China. Land, 11(10): 1817.
- Liu D P, Chen L X, Wang Y H, et al. 2018. How much can we trust GPS wildlife tracking? An assessment in semi-free ranging Crested Ibis *Nipponia nippon*. PeerJ, 6: e5320.
- Liu Q, Chen Y P, Maltby L, et al. 2019. Trace elements exposure of endangered Crested Ibis (*Nipponia nippon*) under *in situ* and *ex situ* conservations. Environmental Pollution, 253: 800–810.
- Ma L M, Li X H, Zhai T Q, et al. 2021. Changes in the habitat preference of Crested Ibis (*Nipponia nippon*) during a period of rapid population increase. Animals, 11(9): 2626.
- Ma L, Chen Z M, Su K W, et al. 2024. Can cooperatives enhance the income-generating effect of eco-industries for farmers?—Empirical evidence from the Crested Ibis National Nature Reserve, Forests, 15(5): 757.
- Maharjan K L, Gonzalvo C M, Aala W J F. 2022. Drivers of environmental conservation agriculture in Sado Island, Niigata Prefecture, Japan. Sustainability, 14(16): 9881.
- Nakanishi K, Akanuma H, Kobayashi R, et al. 2025. Experimental test of the effects of prolonged flooding practices on animal communities in rice paddy fields. Agriculture, Ecosystems &

- Environment, 379: 109369.
- Ren Y P, Ding C Q, Zhang Y Z, et al. 2022. Public attitudes and willingness to pay toward the conservation of Crested Ibis: insights for management. *Journal for Nature Conservation*, 66: 126118.
- Song Z T, Zou Y Q, Hu C S, et al. 2019. Silver spoon effects of hatching order in an asynchronous hatching bird. *Behavioral Ecology*, 30(2): 509–517.
- Sun Y W, Wang T J, Skidmore A K, et al. 2015. Decline of traditional rice farming constrains the recovery of the endangered Asian Crested Ibis (*Nipponia nippon*). *Ambio*, 44(8): 803–814.
- Sun Y W, Wang T J, Skidmore A K, et al. 2016. Predicting and understanding spatio temporal dynamics of species recovery: implications for Asian Crested Ibis *Nipponia nippon* conservation in China. *Diversity & Distributions*, 22(8): 893–904.
- Toyoda M. 2017. Designing consensus building processes for co-inhabitation with the Crested Ibis: a challenge in the age of depopulation. *Wildlife & Human Society*, 5(1): 29–40.
- Tuohetahong Y L M J, Lu R Y, Guo R Y, et al. 2024. Climate and land use/land cover changes increasing habitat overlap among endangered Crested Ibis and sympatric egret/heron species. *Scientific Reports*, 14: 20736.
- Uenishi Y. 2019. Factors that encourage farmers to adopt farming methods to conserve the Japanese Crested Ibis. *Agricultural Information Research*, 28(3): 127–142.
- Wang J H, Su W T, Hu Y, et al. 2022. Comparative chromosome maps between the stone curlew and three ciconiiform species (the Grey Heron, Little Egret and Crested Ibis). *BMC Ecology & Evolution*, 22(1): 23.
- Wang L, Sun L, Wan Q H, et al. 2022. Comparative genomics provides insights into adaptive evolution in tactile foraging birds. *Genes*, 13(4): 678.
- Xie H L, Li W, Zhang R T, et al. 2024. *Edwardsiella tarda* causing septicemia in a wild Crested Ibis (*Nipponia nippon*). *Journal of Wildlife Diseases*, 60(1): 232–235.
- Xie J J, Yang J, Ding C Q, et al. 2020. High accuracy individual identification model of Crested Ibis (*Nipponia nippon*) based on autoencoder with self-attention. *IEEE Access*, 8: 41062–41070.
- Xu L L, Ren Y D, Wu J H, et al. 2024. Evolution and expression patterns of the neo-sex chromosomes of the Crested Ibis. *Nature Communications*. 15(1): 1670.
- Xu X L, Jiang J H, Lei Y, et al. 2022. Using stable isotope to compare the habitat use and trophic level between the new and old breeding range of wild Crested Ibis in the early breeding season. *Avian Research*, 13: 100007.
- Xu X L, Ye Y X, Briggs E, et al. 2023. Why do parents produce small broods of offspring that have lower body mass, survival, and lifetime reproductive success? A case study in a long-lived bird. *Behavioral Ecology & Sociobiology*, 77(3): 30.
- Yang J, Liu X L, Zhang J Q, et al. 2015. Genetics and evolution of plumage color in Crested Ibis: analysis of the melanocortin-1 receptor (MC1R). *Cellular & Molecular Biology*, 61(4): 63–69.
- Yang J, Su K W, Zhang Z Y, et al. 2024b. Perceived benefit, policy incentive and farmers' organic fertilizer application in protected areas. *Agriculture*, 14(6): 810.
- Yang J, Su K W, Zhou Z Y, et al. 2022. The impact of tourist cognition on willing to pay for rare species conservation: base on the questionnaire survey in protected areas of the Qinling region in China. *Global Ecology & Conservation*, 33: e01952.
- Yang J, Xu Z K, Wan D D, et al. 2024a. Pollution characteristics of heavy metals, antibiotic and antibiotic resistance genes in the Crested Ibis and their habitat across different lifestyle and geography. *Environmental Research*, 261(000): 11.
- Ye Y X, Jiang Y T, Hu C S, et al. 2017. What makes a tactile forager join mixed-species flocks? A case study with the endangered Crested Ibis (*Nipponia nippon*). *The Auk: Ornithological Advances*, 134(2): 421–431.
- Ye Y X, Simone S, Song Z T, et al. 2023. Dispersal patterns of the endangered Crested Ibis suggest high breeding densities drive natal dispersal. *Ornithological Applications*, 125(1): duac042.
- Zhao S B, Xie J J, Ding C Q, 2023. Automatic individual recognition of wild Crested Ibis based on hybrid method of self-supervised learning and clustering. *Ecological Informatics*, 75: 102089.
- Zhu Y, Ma R F, Hu L, et al. 2024. Structure, variation and assembly of body-wide microbiomes in endangered Crested Ibis *Nipponia nippon*. *Molecular Ecology*, 33(3): e17238.
- Zou Y Q, Jiang Y Q, Song Z T, et al. 2024. The Crested Ibises expanding to plain areas exhibit a higher tolerance of human proximity. *Avian Research*, 15(1): 100165.
- 陈枫楠, 陈红宇, 洪倩, 等. 2024. 基于 MaxEnt 模型的秦岭南部朱

- 鹮栖息地适宜性评价. 北京师范大学学报: 自然科学版, 60(4): 491–498. [Chen F N, Chen H Y, Hong Q, et al. 2024. Habitat suitability assessment of Crested Ibis in southern Qinling Mountains by MaxEnt modeling. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 60(4): 491–498.]
- 丁长青. 2004. 朱鹮研究. 上海: 上海科技教育出版社. [Ding C Q. 2004. Research on the Crested Ibis. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Education Publishing House.]
- 丁长青, 李峰. 2005. 朱鹮的保护与研究. 动物学杂志, 40(6): 54–57. [Ding C Q, Li F. 2005. Conservation and research of Crested Ibis. Chinese Journal of Zoology, 40(6): 54–57.]
- 杜枫林. 2020. 朱鹮 (*Nipponia nippon*) 繁殖时间对窝卵数和雏鸟性比的影响研究. 北京: 北京林业大学硕士学位论文. [Du F L. 2020. Effects of breeding time on clutch size and offspring sex ratios of Crested Ibis (*Nipponia nippon*). Beijing: Beijing Forestry University, Master's dissertation]
- 段伟, 温亚利, 王昌海. 2013. 朱鹮国家级自然保护区农户对环境和朱鹮保护的态度影响因素分析. 湿地科学, 11(1): 90–99. [Duan W, Wen Y L, Wang C H. 2013. Influence factors of farmers' attitudes toward environment and Crested Ibis conservation in Crested Ibis National Nature Reserve. Wetland Science, 11(1): 90–99.]
- 高岳芳. 2010. 濒危物种朱鹮的保护研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文. [Gao Y F. 2010. Study on conservation of endangered Species *Nipponia nippon*. Yangling: Northwest A&F University, Master's dissertation.]
- 郭向荣, 温亚利. 2012. 保护区农户朱鹮保护意愿的影响因素分析. 林业经济问题, 32(5): 444–449. [Guo X R, Wen Y L. 2012. Analysis on factors influencing peasant households protection awareness of Crested Ibises. Issues of Forestry Economics, 32(5): 444–449.]
- 胡灿实. 2016. 朱鹮 (*Nipponia nippon*) 活动性及其扩散模式研究. 北京: 北京林业大学博士学位论文. [Hu C S. 2016. The home range and dispersal ecology of Crested Ibis (*Nipponia nippon*). Beijing: Beijing Forestry University, Doctoral dissertation.]
- 李欣悦, 蒋娴, 曹卫群, 等. 2023. 鸟类卫星跟踪数据可视分析方法研究——以朱鹮为例. 中国图象图形学报, 28(8): 2549–2560. [Li X Y, Jiang X, Cao W Q, et al. 2023. Research on visual analysis methods of bird satellite tracking data: a case study analysis for *Nipponia nippon*. Journal of Image and Graphics, 28(8): 2549–2560.]
- 刘冬平, 王超, 庆保平, 等. 2014. 朱鹮保护 30 年——基于社区的极小种群野生动物保护典范. 四川动物, 33(4): 612–619. [Liu D P, Wang C, Qing B P, et al. 2014. Thirty-years' conservation of Crested Ibis *Nipponia nippon* in China: A model for community-based conservation of animal species with extremely small populations. Sichuan Journal of Zoology, 33(4): 612–619.]
- 刘荫增. 1981. 朱鹮在秦岭的重新发现. 动物学报, 27(3): 273–273. [Liu Y Z. 1981. Recovery of the Crested Ibis in the Qinling range. Acta Zoologica Sinica, 27(3): 273–273.]
- 彭少麟, 周婷, 廖慧斌. 2020. 恢复生态学. 北京: 科学出版社, 116–117. [Peng S L, Zhou T, Liao H X. 2020. Restoration Ecology. Beijing: Science Press, 116–117.]
- 庆保平, 曾键文, 高洁, 等. 2021. 朱鹮囊螨病的诊断. 畜牧兽医杂志, 40(5): 113–117. [Qing B P, Zeng J W, Gao J, et al. 2021. Diagnosis of Cyest Mites in Crested Ibis. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 40(5): 113–117.]
- 庆保平, 叶元兴, 张亚祖, 等. 2022a. 2016 至 2019 年朱鹮野生种群收容救护现状分析. 动物学杂志, 57(2): 196–204. [Qing B P, Ye Y X, Zhang Y Z, et al. 2022a. Analysis on the Wild Population Rescue of Crested Ibis (*Nipponia nippon*) from 2016 to 2019. Chinese Journal of Zoology, 57(2): 196–204.]
- 庆保平, 叶元兴, 张亚祖, 等. 2022b. 陕南地区野生朱鹮个体死亡原因分析. 野生动物学报, 43(1): 93–98. [Qing B P, Ye Y X, Zhang Y Z, et al. 2022b. Causes of mortality of wild Crested Ibis (*Nipponia nippon*) in Southern Shaanxi. Chinese Journal of Wildlife, 43(1): 93–98.]
- 庆保平, 张亚祖, 段英, 等. 2022c. 朱鹮致病性简达气单胞菌的分离鉴定. 动物医学进展, 43(12): 129–133. [Qing B P, Zhang Y Z, Duan Y, et al. 2022c. Isolation and identification of Pathogenic *Aeromonas jandaris* from Crested Ibis. Progress in Veterinary Medicine, 43(12): 129–133.]
- 全国野生动物保护管理与经营利用标准化技术委员会. 2024. GB/T 44735-2024 野生动物保护繁育朱鹮. 国家林业和草原局. [S/OL]. [2024-10-26]. http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=B56AC49576FCA85CB8768144DF284EC5&request_locale=zh. [Wildlife Conservation Management and Husbandry Business. GB/T 44735-2024 Conservation and captive breeding for wildlife—Crested Ibis. National Forestry and Grassland Administration. [S/OL]. [2024-10-26].

- http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=B56AC49576FCA85CB8768144DF284EC5&request_locale=zh.
- 陕西省市场监督管理局. 2023. DB61/T 1682-2023 朱鹮收容救护技术规范. 陕西省林业局. [S/OL]. [2023-5-25]. <https://dbba.sacinfo.org.cn/attachment/onlineRead/e304e6f0037274b7f3831a01e5399f5f7d924fe599b07075ec0d7a9ab9eff465>. [Shaanxi Administration for Market Regulation. DB61/T 1682-2023 Technical Specifications for Crested Ibis Shelter Rescue. Shaanxi Forestry Bureau. [S/OL]. [2023-5-25]. <https://dbba.sacinfo.org.cn/attachment/onlineRead/e304e6f0037274b7f3831a01e5399f5f7d924fe599b07075ec0d7a9ab9eff465>.]
- 邵乐乐, 杨永春, 马武林, 等. 2023. 1 株朱鹮源红斑丹毒丝菌的分离鉴定及生物学特征分析. 中国预防兽医学报, 45(12): 1245–1252. [Shao L L, Yang Y C, Ma W L, et al. 2023. Isolation, identification and biological characteristics of *Erysipelothrix rhusiopathiae* from Crested Ibis. Chinese Journal of Preventive Veterinary Medicine, 45(12): 1245–1252.]
- 史东仇, 曹永汉. 2001. 中国朱鹮. 北京: 中国林业出版社. [Shi D Q, Cao Y H. 2001. The Crested Ibis of China. Beijing: China Forestry Publishing House.]
- 苏凯文, 任婕, 侯一蕾, 等. 2024. 基于空间分析的洋县朱鹮栖息地有机农业生态效应研究. 自然保护地, 4(2): 108–123. [Su K W, Ren J, Hou Y L, et al. 2024. Study on the ecological effect of organic farming in the habitat of Crested Ibis in Yang County based on spatial analysis. Natural Protected Areas, 4(2): 108–123.]
- 孙博, 段伟, 丁慧敏, 等. 2017. 基于选择实验法的湿地保护区农户生态补偿偏好分析——以陕西汉中朱鹮国家级自然保护区周边社区为例. 资源科学, 39(9): 1792–1800. [Sun B, Duan W, Ding H M, et al. 2017. Preference analysis of household ecological compensation in Crested Ibis protected area in Hanzhong, Shaanxi based on choice experiments. Resources Science, 39(9): 1792–1800.]
- 王斌, 张娜, 冯航, 等. 2021. 朱鹮产气荚膜梭菌的分离鉴定和致病性. 中国兽医学报, 41(9): 1770–1773, 1784. [Wang B, Zhang N, Feng H, et al. 2021. Isolation, identification and study on pathogenicity of *Clostridium perfringens* from *Nipponia nippon*. Chinese Journal of Veterinary Science, 41(9): 1770–1773, 1784.]
- 王超, 曾键文, 张亚祖, 等. 2022c. 一种朱鹮运输周转箱. 中国, CN202220988913.9. 2022-07-26. [Wang C, Zeng J W, Zhang Y Z, et al. 2022c. Live wild animal transport container for Crested Ibis. China, CN202220988913.9. 2022-07-26.]
- 王超, 闫鲁, 高洁, 等. 2020b. 陕西汉中朱鹮在输电铁塔上的营巢状况及保护建议. 动物学杂志, 55(6): 712–719. [Wang C, Yan L, Gao J, et al. 2020b. Status of pylon-nesting of Crested Ibis (*Nipponia nippon*) with conservation suggestions in Hanzhong of Shaanxi Province, China. Chinese Journal of Zoology, 55(6): 712–719.]
- 王超, 张亚祖, 曾键文, 等. 2020a. 中国野生朱鹮的繁殖现状和种群数量. 林业科学, 56(11): 143–150. [Wang C, Zhang Y Z, Zeng J W, et al. 2020a. Reproductive status and population size of wild Crested Ibis (*Nipponia nippon*) in China. Scientia Silvae Sinicae, 56(11): 143–150.]
- 王华强, 全艺伟, 张雅帅, 等. 2024. 基于种群生存力分析的陕西铜川朱鹮再引入种群的可持续性保护对策. 野生动物学报, 45(1): 75–83. [Wang H Q, Tong Y W, Zhang Y S, et al. 2024. Sustainability and conservation strategies of reintroduced Crested Ibis population in Tongchuan, Shaanxi based on population viability analysis. Chinese Journal of Wildlife, 45(1): 75–83.]
- 王永生, 杨园园, 刘彦随, 等. 2021. 洋县黑米草坝村朱鹮栖息地生态环境保护与可持续发展案例研究. 全球变化数据学报, 5(3): 290–299. [Wang Y S, Yang Y Y, Liu Y S, et al. 2021. Ecological conservation and sustainable development: a case study of the Crested Ibis habitat and black rice cultivation in Caoba Village, Yang County. Journal of Global Change Data & Discovery, 5(3): 290–299.]
- 夏卓异, 苏杰, 尹海伟, 等. 2023. 气候变化背景下中国朱鹮适宜生境时空格局. 应用生态学报, 34(6): 1467–1473. [Xia Z Y, Su J, Yin H W, et al. 2023. Temporal and spatial patterns of habitat of *Nipponia nippon* in China under the background of climate change. Chinese Journal of Applied Ecology, 34(6): 1467–1473.]
- 闫鲁, 黄治学. 2021. 35 年来朱鹮的保护经验与发展思路. 野生动物学报, 42(3): 890–896. [Yan L, Huang Z X. 2021. Thirty five years conservation experience of Crested Ibis (*Nipponia nippon*) and future perspectives. Chinese Journal of Wildlife, 42(3): 890–896.]
- 杨骏, 周修涛, 张云德, 等. 2025. 广元市鸟类名录更新. 西华师范大学学报: 自然科学版, 1–8. [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1699.N.20251120.1514.002>. [Yang J, Zhou X T,

- Zhang Y D, et al. 2025. Updates to the checklist of birds in Guangyuan. Journal of China West Normal University : Natural Sciences, 1–8. [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1699.N.20251120.1514.002>.]
- 叶元兴. 2018. 朱鹮野生种群扩散生态学研究. 北京: 北京林业大学博士学位论文. [Ye Y X. 2018. Dispersal ecology of the wild Crested Ibis (*Nipponia nippon*). Beijing: Beijing Forestry University, Doctoral dissertation.]
- 咎林森. 2023. 朱鹮保护策略与创新实践. 西安: 西北农林科技大学出版社. [Zan L S. 2023. Strategies and Innovations in Crested Ibis Conservation. Xi'an: Northwest A&F University press.]
- 曾键文, 庆保平, 路晋, 等. 2017. 陕西汉中野生朱鹮雏鸟的生长发育特征. 动物学杂志, 52(5): 777–782. [Zeng J W, Qing B P, Lu J, et al. 2017. The growth rate of the wild Crested Ibis (*Nipponia nippon*) in Hanzhong, Shaanxi Province. Chinese Journal of Zoology, 52(5): 777–782.]
- 曾键文, 权海云, 庆保平, 等. 2018. 野生朱鹮秋季种群数量调查评价方法初探. 野生动物学报, 39(2): 329–333. [Zeng J W, Quan H Y, Qing B P, et al. 2018. Estimating Crested Ibis population numbers based on autumn nocturnal roost-site patches. Chinese Journal of Wildlife, 39(2): 329–333.]
- 曾键文, 张亚祖, 王超, 等. 2021. 朱鹮对冬季农田的觅食选择. 四川动物, 40(5): 525–531. [Zeng J W, Zhang Y Z, Wang C, et al. 2021. Foraging habitat selection of *Nipponia nippon* in farmlands in winter. Sichuan Journal of Zoology, 40(5): 525–531.]
- 张洪峰, 胡罕, 苏丽娜, 等. 2017. 秦岭交通建设与野生动物保护. 西安: 陕西科学技术出版社, 132–151. [Zhang H F, Hu H, Su L N, et al. 2017. Transportation Construction and Wildlife Protection in the Qinling Mountains. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 132–151.]
- 张辉, 邵乐乐, 杨永春, 等. 2023. 朱鹮大肠杆菌分离鉴定及耐药性与喹诺酮类耐药基因分子特征分析. 中国畜牧兽医, 50(10): 4231–4242. [Zhang H, Shao L L, Yang Y C, et al. 2023. Isolation, identification and molecular characteristics of drug resistance and quinolone resistance genes in *Escherichia coli* from *Nipponia nippon*. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 50(10): 4231–4242.]
- 张慧, 高吉喜, 马孟泉, 等. 2017. 基于 MaxEnt 模型的道路对朱鹮繁殖地的影响. 应用生态学报, 28(4): 1352–1359. [Zhang H, Gao J X, Ma M X, et al. 2017. Influence of road on breeding habitat of *Nipponia nippon* based on MaxEnt model. Chinese Journal of Applied Ecology, 28(4): 1352–1359.]
- 张亢敏楠. 2023. 人口外流视角下滇黔民族地区乡村治理中的村民参与研究. 南宁: 南宁师范大学硕士学位论文. [Zhang K M. 2023. A study on the participation of villagers in rural governance in Yunnan Guizhou ethnic areas from the perspective of population outflow. Nanning: Nanning Normal University, Master's dissertation.]
- 张漫慧, 赵泓淙, 王彩霞. 2020. 应用于 PCR 性别鉴定的朱鹮粪便基因组提取方法的建立. 湖北畜牧兽医, 41(8): 5–7. [Zhang M H, Zhao H C, Wang C X. 2020. Development of a fecal genomic DNA extraction method for PCR-based sex identification in the Crested Ibis (*Nipponia nippon*). Hubei Journal of Animal and Veterinary Sciences, 41(8): 5–7.]
- 张引, 刘海龙, 杨锐. 2020. 社区共管与协调生态保护和可持续发展——基于秦巴山脉区域 5 个典型案例的分析. 中国工程科学, 22(1): 111–119. [Zhang Y, Liu H L, Yang R. 2020. Coordinate conservation with sustainable development by community-based co-management: an analysis of five typical cases in Qinba Mountain area. Engineering Sciences, 22(1): 111–119.]
- 张智, 丁长青. 2008. 中国朱鹮就地保护与研究进展. 科技导报, 26(14): 48–53. [Zhang Z, Ding C Q. 2008. The *in-situ* conservation of created Ibis and relate research progress. Science & Technology Review, 26(14): 48–53.]
- 赵洪峰, 王玲, 李璇. 2024. 甘肃天水重新发现朱鹮. 动物学杂志, 59(2): 319–320. [Zhao H F, Wang L, Li X. 2024. Rediscovery of Crested Ibis *Nipponia nippon* in Tianshui, Gansu, China. Chinese Journal of Zoology, 59(2): 319–320.]
- 郑光美. 2023. 中国鸟类分类与分布名录. 4 版. 北京: 科学出版社: 78–79. [Zheng G M. 2023. A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China. 4th ed. Beijing: Science press: 78–79.]
- 朱梦. 2020. 陕西宁陕朱鹮 (*Nipponia nippon*) 再引入种群的扩散生态学研究. 西安: 陕西师范大学硕士学位论文. [Zhu M. 2020. A study on dispersal ecology of the reintroduced *Nipponia nippon* population in Ningshan, Shaanxi. Xi'an: Shaanxi Normal University, Master's dissertation.]