

德清和洋县朱鹮人工繁育种群的营养生态位差异

邱国强¹ 徐向龙² 李希宁² 石坚¹ 袁李莹¹ 代雯雯¹ 朱芸²
段文斌³ 高洁³ 姜家虎² 丁长青^{2*}

1 德清县生态林业综合服务中心 德清 313200; 2 北京林业大学生态与自然保护学院 北京 100083;

3 陕西汉中朱鹮国家级自然保护区管理局 洋县 723300

摘要: 朱鹮 (*Nipponia nippon*) 是世界濒危鸟类, 探明其营养生态位对制定保护管理对策具有重要意义。2008 年, 浙江省德清县从陕西省引进 10 只朱鹮建立了人工繁育种群, 截至目前该人工种群规模已发展至 382 只, 成为了中国南方地区朱鹮野化放飞工程的重要种源输出基地。然而, 由于缺乏有效的技术方法和评价指标, 德清人工饲养朱鹮的营养状况尚未被评估, 制定有效的饲养管理措施缺少科学依据。基于稳定同位素分析技术的同位素生态位能实现非损伤取样, 为量化动物的食性和营养级水平提供了新的途径。本研究于 2022 和 2023 年采集了德清和洋县各 10 只人工饲养朱鹮个体的羽毛样本, 通过检测羽毛样本中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素值, 量化评价了德清和洋县朱鹮人工饲养种群的营养生态位及其差异。结果发现, 相比于洋县种群, 德清朱鹮人工饲养种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值显著较大 ($t = 12.94$, $df = 17.72$, $P < 0.001$), $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围和平均值相对较小。德清种群同位素的贝叶斯标准椭圆面积 (SEA_B) 较小 (1.19‰^2 vs. 1.77‰^2), 且两者的位置显著分离, 表明德清人工繁育朱鹮种群取食食物的营养级较低。此外, 饲养朱鹮种群的营养生态位均显著低于野生朱鹮种群。这些结果表明, 在野化训练期间增加朱鹮食物的多样性可能有助于提高放归成效。建议加强朱鹮野化训练网笼内的环境丰容和管理维护, 优化饲料配比、泥鳅品类选择等, 丰富食物种类, 进一步提升饲养朱鹮种群质量。

关键词: 稳定同位素分析; 人工繁育; 再引入; 食性; 朱鹮

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2026) 03-305-09

Differences in the trophic niche of captive-bred Crested Ibis populations from Deqing and Yangxian

QIU Guo-Qiang¹ XU Xiang-Long² LI Xi-Ning² SHI Jian¹ YUAN Li-Ying¹ DAI Wen-Wen¹
ZHU Yun² DUAN Wen-Bin³ GAO Jie³ JIANG Jia-Hu² DING Chang-Qing^{2*}

1 Deqing County Ecological Forestry Comprehensive Service Center, Deqing 313200; 2 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3 Shaanxi Hanzhong Crested Ibis National Nature Reserve, Yangxian 723300, China

基金项目 德清县生态林业综合服务中心项目 (No. ZJXRQ-2024-JC69), 国家自然科学基金项目 (No. 32270554, 32400400);

* 通信作者, E-mail: cqding@bjfu.edu.cn;

第一作者介绍 邱国强, 男, 高级工程师; 研究方向: 朱鹮饲养繁育与保护管理; E-mail: qiuguogiang7777@163.com。

收稿日期: 2025-11-24, 修回日期: 2026-02-02 DOI: 10.13859/j.cjz.202625222 CSTR: 32109.14.cjz.202625222

Abstract: [Objectives] Investigating the dietary information and trophic niche of animals has great significance for assessing individual quality and formulating conservation and management strategies. The Crested Ibis (*Nipponia nippon*) is an endangered species. Since 10 individuals were reintroduced to Deqing, Zhejiang in 2008, the Deqing captive-bred population has grown to 382 individuals and has now become an important source base for the Crested Ibis reintroduction program in southern China. However, due to the lack of effective technical methods and evaluation indicators, the trophic status of the captive-bred population in Deqing has not been assessed. Consequently, the formulation of conservation management measures lacks a scientific basis. The isotopic niche, based on stable isotope analysis, provides a novel approach for quantifying animal diets and trophic levels. [Methods] In this study, feather samples were collected from captive-bred Crested Ibis populations in both Deqing and Yangxian (10 samples per site) in 2022 and 2023. By measuring the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in the feather samples, we quantitatively evaluated the trophic niches and their differences between the captive-bred populations in Deqing and Yangxian. [Results] The Deqing population exhibited a similar range of $\delta^{13}\text{C}$ values, a significantly higher mean $\delta^{13}\text{C}$ value ($t = 12.94$, $df = 17.72$, $P < 0.001$), and slightly lower range and mean of $\delta^{15}\text{N}$ values ($W = 0.94$, $P > 0.05$) in comparison with the Yangxian population (Fig. 1). Furthermore, the Bayesian standard ellipse area (SEA_B) of the Deqing population was smaller (1.19‰^2 vs. 1.77‰^2), and the isotopic niches of the two populations were significantly separated without overlap (Table 1, Fig. 2). These findings indicated that the captive-bred population in Deqing occupied a lower trophic level in their diet, which may contribute to the poorer physical condition. Furthermore, we found that the trophic niche of captive-bred populations was significantly lower than that of wild populations. This suggests that increasing dietary diversity during acclimation may improve reintroduction outcomes. We recommend enhancing environmental enrichment and management within the acclimation cage, optimizing feed formulations and loach variety selection to diversify food sources, thereby improving the overall quality of captive-bred populations. [Conclusion] Overall, this study demonstrates that $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values for feathers, along with isotopic niche, can serve as quantitative indicators for assessing the dietary information of captive-bred Crested Ibis populations, thereby providing a scientific basis for informing conservation and management strategies.

Key words: Stable isotopes analysis; Captive breeding; Reintroduction; Diet; *Nipponia nippon*

当前,受人类活动和气候变化等因素的影响,物种灭绝速率加快,生物多样性保护已成为国际关注的热点问题(Cowie et al. 2022)。易地保护(*ex-situ* conservation)是拯救和保护濒危动物种质资源的重要手段,通过建立数量稳定、健康发展的人工繁育种群,逐步开展野化放归,将有效扩大物种分布范围,降低灭绝风险。然而,由于人工种群繁殖成功率低、饲养个体体质欠佳等原因,导致种源数量和质量不高,放归个体野外适应能力差,许多再引入项目以失败告终(Fischer and Lindenmayer 2000)。

朱鹮(*Nipponia nippon*)是我国国家一级重点保护野生动物,被世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)受胁物种红色名录列为濒危级(Endangered, EN)物种。自1981年在陕西洋县重新发现朱鹮野生种群以来(刘荫增 1981),经过严格的就地保护(*in-situ* conservation),其野生种群数量已从发现时的7只增长到2023年的6600余只(段文斌等 2025)。我国从朱鹮保护之初就制定了就地保护和易地保护并进的策略,在坚持就地保护野生种群的同时,积

极探索实施易地保护(丁长青 2004)。2008 年,浙江德清下渚湖国家湿地公园从陕西省引进 10 只朱鹮,建立了我国长江中下游地区首个人工饲养种群(邱国强等 2025)。经过十余年的繁育壮大,人工种群数量已发展到 382 只,先后为浙江、湖南、江苏等地野化放归项目输出种源。德清朱鹮人工种群和野化放飞种群建设取得了显著成效,为重建中国南方朱鹮种群积累了宝贵的经验(邱国强等 2020, 2023, 陈小南等 2025, 邱国强等 2025)。然而,相较于其他种群,目前德清朱鹮人工繁育种群的营养状况仍不清楚,野化放飞个体的选择和制定保护管理对策缺少依据。近年来,我国高度重视珍稀濒危野生动物的保护工作,《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》(<https://www.forestry.gov.cn/c/ww/gkzfwj/272642.jhtml>)将朱鹮等 48 个物种列为抢救性保护珍稀濒危野生动物,提出开展朱鹮等 15 种珍稀濒危动物的野化放归。因此,迫切需要开展科学研究,提出科学有效的技术手段和评价指标,量化评估朱鹮饲养个体的状况,为野化放归工程提供理论依据和技术支撑。

食物状况直接影响鸟类的生长、生存和繁殖(Rushing et al. 2016)。营养生态位(trophic niche)是衡量动物食谱宽度和所消耗食物资源多样性的指标(Hutchinson 1957, Bearhop et al. 2004, Mills et al. 2021)。自 Bearhop 等(2004)提出利用稳定同位素分析(stable isotope analysis, SIA)精确量化动物营养生态位的方法后,稳定同位素分析与营养生态位已成为动物觅食生态研究的热点(张璇等 2013, 王玄等 2017, Han et al. 2019, 徐承香等 2021, Xu et al. 2022)。碳和氮同位素是动物觅食生态研究中最常用的同位素,稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)可以用来推断动物的觅食位置和觅食地类型;而稳定氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)主要源自食物中氮(N)的富集,可以用来推断动物的食性及所处的营养级水平(Bearhop et al. 2002, Kowalczyk et al. 2014, 王玄等 2015)。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 结合可以估

算种群的同位素生态位(isotopic niche),为量化动物的营养生态位提供了一种替代量度(Bearhop et al. 2004, Marshall et al. 2019, Bortoluzzi et al. 2021)。本研究利用稳定同位素分析方法定量化检测了德清和洋县朱鹮人工饲养种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值及同位素生态位,并比较了两个种群的差异,旨在评价其利用的食物资源状况及营养级水平,为野化放归种群筛选和指导饲养种群食物配方的调整优化提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

德清朱鹮繁育基地位于浙江省湖州市德清县下渚湖国家湿地公园。下渚湖国家湿地公园地处德清县东南部($30^{\circ}31'\text{N}$, $120^{\circ}03'\text{E}$),面积约 36 km^2 ,其中水域面积 3.4 km^2 ,是浙江省第五大内陆湖。2008 年 4 月,浙江德清启动朱鹮种群重建与野外放归项目,从陕西楼观台引进 5 对朱鹮,在下渚湖国家湿地公园建立了长江以南第一个朱鹮人工繁育种群,逐步发展为朱鹮易地保护暨浙江种群重建基地、浙江省朱鹮抢救保护基地。基地建有野化训练网笼 1 座,占地面积约 $2\ 700\text{ m}^2$,网笼内进行了模拟野外自然环境的丰容,设有草地、浅水湿地、乔木等生境类型。经过十多年的不懈努力,基地先后攻克饲养、繁育等难关,形成一套成熟的朱鹮人工饲养繁育技术体系,德清朱鹮人工种群已成为目前全国规模最大的人工繁育种群,为浙江和中国南方地区朱鹮野外种群的重建奠定了坚实的基础。

陕西洋县朱鹮人工繁育中心位于洋县纸坊街道周家坎村($33^{\circ}15'\text{N}$, $107^{\circ}32'\text{E}$)。繁育中心建有朱鹮野化训练网笼 1 座,占地面积约 $5\ 400\text{ m}^2$,网笼内同样营造了模拟野外环境的生境类型。繁育中心及网笼具体情况见段文斌等(2025)。目前,洋县朱鹮人工饲养种群以野化训练网笼内笼养个体为主,并实现了大网笼内亲鸟自然繁育(包括孵卵和育雏),大幅减少

了朱鹮常规饲养笼舍内个体数量及完全人工繁育的比例, 饲养个体质量显著提升。野化训练大网笼内, 个体除取食日常投喂的泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) 和黄粉虫 (*Tenebrio molitor*) 等食物外, 还可取食笼内草地自然生长的昆虫等。

1.2 样本采集

动物不同组织中的同位素特征反映了动物在不同时间尺度的食性信息, 羽毛中的稳定同位素反映了鸟类羽毛生长阶段的食性信息 (Hobson 2005)。本研究于 2021 年 5 月和 2022 年 6 月分别采集了洋县和德清朱鹮野化训练网笼内各 10 只人工饲养个体的右翅内侧第 1 枚初级飞羽末端 2 cm 样本。内侧第 1 枚初级飞羽为朱鹮初级飞羽中最小的一枚, 位于初级飞羽和次级飞羽之间, 剪取 2 cm 不会影响其未来的飞行能力。将剪取的 20 份羽毛单独装入信封并标记巢号及个体环志号。

1.3 样本预处理和稳定同位素分析

动物组织样本在进行稳定同位素检测之前, 首先要进行预处理。羽毛样本的预处理参照王玄等 (2015) 和李继荣等 (2016) 总结的方法。首先在通风橱中, 使用有机溶剂氯仿和甲醇体积比为 2:1 的混合溶液清洗羽毛样品, 以去除羽毛样品上的污染物。之后置于通风橱中常温下风干 48 h 至恒重, 最后用不锈钢剪刀将羽毛样品剪碎, 并放入小锡杯内, 低温干燥保存待测 (Cherel et al. 2000, Hobson 2005)。

稳定同位素检测在中国科学院动物研究所的稳定同位素检测实验室进行。将装入锡杯的羽毛样品 (0.15 mg) 在元素分析仪 (Flash 2000, 赛默飞世尔科技, 德国不来梅) 中以 1 800 °C 燃烧以测定稳定碳和氮同位素, 然后用同位素比质谱仪 (253 Plus, 赛默飞世尔科技, 德国不来梅) 对产生的 CO₂ 和 N₂ 气体进行分析, 同位素丰度通过以下公式计算并表示为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$: $\delta X = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}})-1]1\ 000\text{‰}$, 其中, X 表示 ^{13}C 或 ^{15}N , $R_{\text{样品}}$ 表示样品中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 的比率, $R_{\text{标准}}$ 则为国际参考材料碳、氮同位素

比率标准值, ^{13}C 同位素比率的标准物使用国际原子能组织同位素实验室制备的标准物 Vienna Pee Dee Belemnite (V-PDB), ^{15}N 同位素比率的标准物来自 N₂-atm (大气中的氮气)。

1.4 数据分析

首先使用 Shapiro-Wilk 检验验证碳、氮同位素数据是否呈正态分布。若呈正态分布, 则利用独立样本 t 检验分析德清和洋县朱鹮人工饲养种群的羽毛样品中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异显著性; 若不呈正态分布, 则使用 Mann-Whitney U 检验。为评价德清和洋县朱鹮人工饲养种群的营养生态位差异, 本研究基于羽毛样本的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 使用 R 4.4.3 语言 (R Core Team 2024) 的 SIBER 包分别计算了两个种群同位素分布的多边形凸包面积 (convex hull, TA)、基于小样本校正的标准椭圆面积 (standard ellipse area corrected for small sample size, SEAC) 和基于贝叶斯标准方法估算的贝叶斯标准椭圆面积 (Bayesian standard ellipse area, SEAB, 表示为中位数 + 95% 的置信区间), 凸包面积和椭圆面积均代表了同位素生态位的宽度。其中, TA 代表了包含所有样本的总面积; 标准椭圆面积 (SEAC 和 SEAB) 仅包含 40% 的样本数据, 反映了核心同位素生态位的宽度。通过将凸包面积和椭圆面积可视化, 可以更直观地反映不同种群所占据营养生态位的宽度、位置及重叠状况 (Jackson et al. 2011, Mills et al. 2021), 为评价朱鹮所利用食物资源的多样性和营养级差异提供了依据。所有的数据分析和绘图均在 R 4.4.3 (R Core Team 2024) 中进行, 显著性水平设置为 $P \leq 0.05$, 同位素值表示为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果

2.1 种群内个体间同位素值差异

德清朱鹮种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 $-19.41\text{‰} \sim -18.35\text{‰}$ (极差: 1.05‰ , $n = 10$), $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围为 $6.53\text{‰} \sim 11.31\text{‰}$ (极差: 4.77‰ , $n = 10$); 洋县朱鹮种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变

化范围为−21.02‰~−19.84‰（极差：1.18‰， $n = 10$ ）， $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围为 6.49‰~12.02‰（极差为 5.53‰， $n = 10$ ）。相比 $\delta^{13}\text{C}$ 值， $\delta^{15}\text{N}$ 值的个体间差异较大，表明饲养朱鹮所利用的食物种类存在个体间差异。

2.2 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的种群间差异

德清朱鹮人工饲养种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-18.72\text{‰} \pm 0.31\text{‰}$ ($n = 10$)， $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 $7.95\text{‰} \pm 1.37\text{‰}$ ($n = 10$)；洋县朱鹮人工饲养朱鹮种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-20.63\text{‰} \pm 0.35\text{‰}$ ($n = 10$)， $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 $8.77\text{‰} \pm 1.72\text{‰}$ ($n = 10$)。相比于洋县朱鹮人工饲养种群，德清种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著较大 ($t = 12.94$, $df = 17.72$, $P < 0.001$)， $\delta^{15}\text{N}$ 值相对较小，即使并不显著 ($W = 0.94$, $P > 0.05$ (图 1)。

2.3 同位素生态位

相比洋县朱鹮人工饲养种群，德清朱鹮人工饲养种群同位素的总面积 (TA)、基于小样本校正的标准椭圆面积 (SEAc) 以及贝叶斯标准椭圆面积 (SEAB) 均相对较小 (表 1，图 2，3)。此外，根据校正的同位素标准椭圆 (SEAc) 分布图，德清和洋县两个朱鹮人工种

群的同位素生态位位置显著分离，没有重叠，洋县种群的同位素生态位在 $\delta^{15}\text{N}$ 轴上的位置略高于德清种群的同位素生态位 (图 2)。该结果进一步表明德清和洋县朱鹮人工饲养种群的营养生态位及所利用的食物资源多样性存在差异。

3 讨论

3.1 稳定同位素分析探究朱鹮食性信息的有效性

稳定同位素分析 (SIA) 技术克服了传统食性分析的诸多缺点，在确定动物食物来源等方面具有显著的优势 (蔡德陵等 2003, Hobson et al. 2012)。本研究利用 SIA 检测分析了不同地区朱鹮人工饲养种群个体羽毛样本的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值及同位素生态位宽度。结果表明，德清和洋县朱鹮人工饲养种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有显著差异，且同位素生态位在 $\delta^{13}\text{C}$ 轴上的位置明显分离，没有重叠。碳同位素主要来源于当地初级生产者的光合作用并且随食物链各营养级稳定传递，能够反映动物的食物来源地 (Post 2002)。因此， $\delta^{13}\text{C}$ 值和同位素生态位位置的差异与两

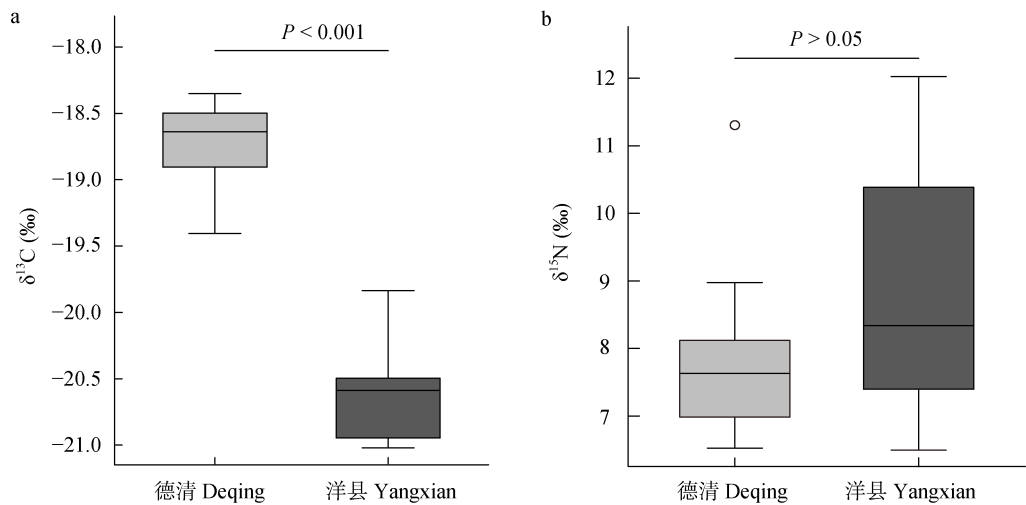


图 1 德清和洋县朱鹮人工饲养种群羽毛的 $\delta^{13}\text{C}$ (a) 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值 (b) 比较

Fig. 1 Comparisons of $\delta^{13}\text{C}$ (a) and $\delta^{15}\text{N}$ (b) in feather samples of captive-bred *Nipponia nippon* populations from Deqing and Yangxian

表 1 德清和洋县朱鹮人工饲养种群的同位素指标值

同位素指标 Isotopic metrics	德清 Deqing	洋县 Yangxian
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-18.72 ± 0.31	-20.63 ± 0.35
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	7.95 ± 1.37	8.77 ± 1.72
总面积 Total area, TA (‰ ²)	2.60	3.25
基于小样本校正的标准椭圆面积 Standard ellipse area corrected for small sample size, SEAc (‰ ²)	1.44	2.08
贝叶斯标准椭圆面积 Bayesian standard ellipse area, SEAB (‰ ²)	1.19 (0.62, 2.41)	1.77 (0.82, 3.37)

括号中数据表示 95%置信区间。Values in parentheses show the 95% confidence intervals.

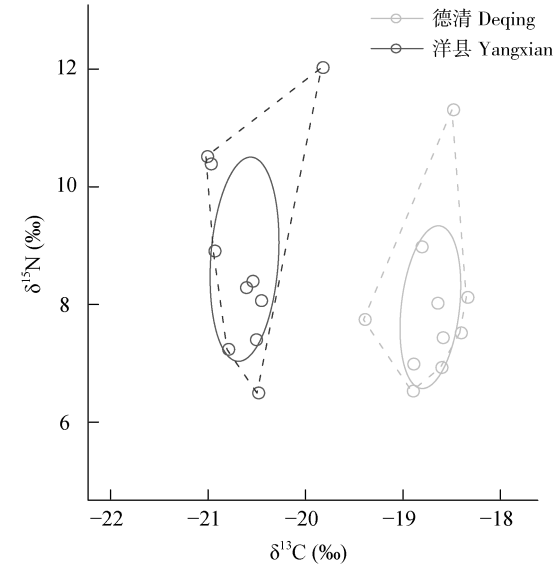


图 2 德清和洋县朱鹮人工饲养种群的同位素生态位

Fig. 2 Isotopic niches for captive-bred *Nipponia nippon* populations from Deqing and Yangxian

图中实线表示代表基于小样本校正的同位素生态位标准椭圆面积 (SEAc), 虚线表示所有个体的总面积, 小圆圈表示每个样本的同位素值。

Solid bold lines (ellipses) represent standard ellipse area corrected for small sample size, showing the areas of isotopic niches. Dotted lines represent the convex hull (total areas, TA) for all individuals. Each small circle represents the isotopic value of a sample.

个人工饲养种群地理分布跨度大、主要饲喂食物 (泥鳅) 来源地不同的情况完全一致。此外, 饲养朱鹮的食物来源和种类相对单一, 而野外朱鹮的觅食地范围相对较广, 食物资源多样性更高, 因此人工饲养朱鹮种群 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的

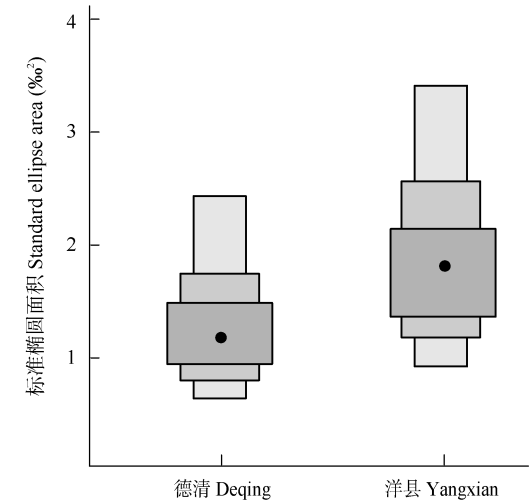


图 3 平均贝叶斯标准椭圆面积

Fig. 3 Mean Bayesian standard ellipse areas

图中由浅灰色到深灰色的箱线图分别表示 50%, 75%和 95%的置信区间, 中间圆点表示平均面积大小。

Boxes from light grey to dark grey represent 50%, 75%, and 95% confidence intervals, and dots represent mean Bayesian standard ellipse areas.

变化范围以及同位素生态位宽度均应显著小于野外种群。与预期相一致, 洋县朱鹮人工饲养种群的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围和贝叶斯标准椭圆面积 (SEAB) 显著小于分布在洋县及周边地区的野生种群的数量 ($\delta^{13}\text{C}$ 极差: 1.18‰ vs. 7.49‰, $\delta^{15}\text{N}$ 极差: 5.53‰ vs. 10.47‰, SEAB: 1.77‰² vs. 6.78‰²) (野生种群数据来源于 Xu et al. 2022)。这些结果验证了碳、氮稳定同位素及同位素生态位指标在量化朱鹮食性信息方

面的有效性，仅利用少量的样本即可精确探测朱鹮食物来源和食物资源多样性差异。因此，基于羽毛样本的稳定同位素检测和分析为评估朱鹮的食性信息提供了一种快速有效的技术手段。

3.2 德清和洋县朱鹮人工饲养种群的营养生态位差异

洋县朱鹮人工饲养种群始建于 1990 年，最初以野外救护的朱鹮作为种源开展人工饲养繁育研究并逐渐发展壮大，截至 2025 年已向国内外十余个地点输出朱鹮种源个体。因此，本研究以陕西洋县朱鹮人工饲养种群为参照，对比分析了德清朱鹮人工饲养种群的食性和营养生态位差异，进而对德清人工饲养朱鹮种群的饲养管理提供科学依据。研究结果表明，相比于洋县饲养种群，德清朱鹮人工饲养种群 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围接近，但平均值显著较大， $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围和平均值相对较小。如上所述，碳同位素值的差异体现了两个不同地理区域种群食物来源的差异，较大的平均值反映了德清朱鹮食物来源地特定的同位素特征。因此， $\delta^{13}\text{C}$ 也常被用来追踪迁徙鸟类栖息地研究，根据鸟类组织的碳同位素特征，结合不同地区同位素本底分布判断迁徙鸟类的繁殖地、越冬地及停歇地等（马志军 2009, 张璇等 2013, Anparasan et al. 2021, Mills et al. 2024）。

氮同位素主要源自食物中 N 的富集，可用来推断动物的食性及所处的营养级（Bearhop et al. 2002, Kowalczyk et al. 2014）。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 结合可以量化动物的同位素生态位宽度，进而更加直观地反映不同群体动物所消耗食物的营养级和食物资源多样性的差异（Bearhop et al. 2004）。相比洋县朱鹮人工饲养种群，德清人工饲养朱鹮种群的 $\delta^{15}\text{N}$ 值相对较小，同位素生态位在 $\delta^{15}\text{N}$ 轴上的位置整体相对较低，这些结果均表明德清人工饲养朱鹮种群取食食物的营养级较低。尽管饲养朱鹮的食谱相对单一，营养生态位较窄，但不同品类，甚至体型大小的同一种食物可能具有不同的同位素特征（Yang

et al. 2021），取食 $\delta^{15}\text{N}$ 值较小的单一种类食物则会导致捕食者所处的营养级较低。食物对动物的生存和繁殖至关重要，当低营养级的食物贡献比较高时，可能导致个体自身的体质欠佳，繁殖力降低。一项针对小企鵝（*Eudyptula minor*）的长期研究发现，在主要食物资源不足的年份，小企鵝不仅延迟繁殖而且繁殖产出降低，而在食物资源丰富度更高的年份，亲鸟取食了更高比例的高营养级食物，促使其繁殖较早且繁殖产出更高（Kowalczyk et al. 2014）。低营养级个体作为种源个体放飞到野外以后，适应新环境、生存和繁殖能力可能较低，进而影响野化放飞项目的成功率。此外，洋县饲养种群的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化范围及同位素生态位宽度较大，也表明朱鹮在野化训练网笼内取食了投喂泥鳅、黄粉虫以外的其他食物。

3.3 保护管理建议

进一步优化德清人工饲养朱鹮种群的食谱组成，如繁殖期幼鸟的饲料配比、泥鳅品类选择，丰富食物种类。鉴于饲养个体与野外个体营养生态位差距明显，应持续提升朱鹮野化训练网笼内的栖息环境，补充投放除泥鳅外的其他食物，为野化训练期间的朱鹮提供更多的选择，丰富营养来源。此外，为了保证放归后首个繁殖季的繁殖成效，建议避免在繁殖期即将来临时（1 至 3 月）放飞，使放归朱鹮有充足的时间适应野外环境并提高营养生态位。根据朱鹮繁殖期的营养需求和确定的营养成分，设计合理的营养补料配方，选择合适的工艺，研发饲养朱鹮繁殖期的特异营养补料，提升幼鸟生长发育期的营养水平，增强个体的体质状况。将稳定同位素分析应用到朱鹮野化放归种群并作为食性监测的常规手段，及时了解个体的觅食状况，为野外栖息地食物资源评价和栖息地修复提供量化指标和科学依据。

参 考 文 献

- Anparasan L, Hobson K A. 2021. Tracing sources of carbon and hydrogen to stored lipids in migratory passerines using stable

- isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$) measurements. *Oecologia*, 195(1): 37–49.
- Bearhop S, Adams C E, Waldron S, et al. 2004. Determining trophic niche width: a novel approach using stable isotope analysis. *Journal of Animal Ecology*, 73(5): 1007–1012.
- Bearhop S, Waldron S, Votier S C, et al. 2002. Factors that influence assimilation rates and fractionation of nitrogen and carbon stable isotopes in avian blood and feathers. *Physiological and biochemical zoology*, 75(5): 451–458.
- Bortoluzzi J, Darby J, Jackson A L. 2021. Technological advances in stable isotope analysis provide ever more insights into animal ecology. *Journal of Animal Ecology*, 90(6): 1394–1397.
- Cherel Y, Hobson K A, Weimerskirch H. 2000. Using stable-isotope analysis of feathers to distinguish moulting and breeding origins of seabirds. *Oecologia*, 122(2): 155–162.
- Cowie R H, Bouchet P, Fontaine B. 2022. The Sixth Mass Extinction: fact, fiction or speculation? *Biological Reviews*, 97(2): 640–663.
- Fischer J, Lindenmayer D B. 2000. An assessment of the published results of animal relocations. *Biological Conservation*, 96(1): 1–11.
- Han H, Wei W, Hu Y B, et al. 2019. Diet evolution and habitat contraction of giant pandas via stable isotope analysis. *Current Biology*, 29(4): 664–669.e2.
- Hobson K A. 2005. Using stable isotopes to trace long-distance dispersal in birds and other taxa. *Diversity and Distributions*, 11(2): 157–164.
- Hobson K A, Van Wilgenburg S L, Wassenaar L I, et al. 2012. A multi-isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^2\text{H}$) feather isoscape to assign Afrotropical migrant birds to origins. *Ecosphere*, 3(5): art44.
- Hutchinson G E. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22: 415–427.
- Jackson A L, Inger R, Parnell A C, et al. 2011. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*, 80(3): 595–602.
- Kowalczyk N D, Chiaradia A, Preston T J, et al. 2014. Linking dietary shifts and reproductive failure in seabirds: a stable isotope approach. *Functional Ecology*, 28(3): 755–765.
- Marshall H H, Inger R, Jackson A L, et al. 2019. Stable isotopes are quantitative indicators of trophic niche. *Ecology Letters*, 22(11): 1990–1992.
- Mills W F, Ibañez A E, Carneiro A P B, et al. 2024. Migration strategies of skuas in the southwest Atlantic Ocean revealed by stable isotopes. *Marine Biology*, 171(1): 27.
- Mills W F, McGill R A R, Cherel Y, et al. 2021. Stable isotopes demonstrate intraspecific variation in habitat use and trophic level of non-breeding albatrosses. *Ibis*, 163(2): 463–472.
- Post D M. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 83(3): 703–718.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. [R/OL]. <https://www.R-project.org/>.
- Rushing C S, Marra P P, Dudash M R. 2016. Winter habitat quality but not long-distance dispersal influences apparent reproductive success in a migratory bird. *Ecology*, 97(5): 1218–1227.
- 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.
- Yang S, Zhang C, Liao W, et al. 2021. Trophic niche shifts in mountain Feirana frogs under human-mediated habitat transformations. *Asian Herpetological Research*, 12(2): 234–241.
- 蔡德陵, 张淑芳, 张经. 2003. 天然存在的碳、氮稳定同位素在生态系统研究中的应用. *质谱学报*, 24(3): 434–440. [Cai D L, Zhang S F, Zhang J. 2003. Ecosystem trophic dynamics studies as traced by natural carbon and nitrogen stable isotopes. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 24(3): 434–440.]
- 陈小南, 徐向龙, 雷宇, 等. 2025. 钱江源国家公园野化放归朱鹮的活动性及其对重建中国朱鹮南方种群的启示. *浙江林业科技*, 45(3): 54–62. [Chen X N, Xu X L, Lei Y, et al. 2025. Movement of released *Nipponia nippon* in Qianjiangyuan National Park and inspiration to the reconstruction of its population in the Southern China. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 45(3): 54–62.]
- 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 & Technological Education Publishing House.]
- 段文斌, 徐向龙, 高洁, 等. 2025. 笼养条件下不同性别朱鹮个体繁育成效的年龄差异. *林业科学*, 61(6): 139–146. [Duan W B, Xu X L, Gao J, et al. 2025. Age difference of male and female

- individuals in natural breeding effectiveness of the captive *Nipponia nippon*. *Scientia Silvae Sinicae*, 61(6): 139–146.]
- 李继荣, 李来兴, 杨乐. 2016. 鸟类组织稳定同位素分析样品的预处理方法. *动物学杂志*, 51(3): 477–486. [Li J R, Li L X, Yang L. 2016. Pretreatment methods for stable isotope analysis of avian tissues. *Chinese Journal of Zoology*, 51(3): 477–486.]
- 刘荫增. 1981. 朱鹮在秦岭的重新发现. *动物学报*, 27(3): 273. [Liu Y Z. 1981. Recovery of Japanese Crested Ibis *Nipponia nippon* in Qin-Ling range. *Acta Zoologica Sinica*, 27(3): 273.]
- 马志军. 2009. 鸟类迁徙的研究方法和研究进展. *生物学通报*, 44(3): 5–9. [Ma Z J. 2009. Research methods and advances in avian migration. *Bulletin of Biology*, 44(3): 5–9.]
- 邱国强, 付春正, 张睿灿, 等. 2020. 朱鹮圈养种群与野外重引入种群行为差异研究. *野生动物学报*, 41(2): 376–386. [Qiu G Q, Fu C Z, Zhang R C, et al. 2020. Behavioral differences between captive and reintroduced populations of Crested Ibis (*Nipponia nippon*). *Chinese Journal of Wildlife*, 41(2): 376–386.]
- 邱国强, 姜家虎, 白洪青, 等. 2023. 浙江德清野化放归朱鹮的繁殖行为. *动物学杂志*, 58(3): 348–356. [Qiu G Q, Jiang J H, Bai H Q, et al. 2023. Reproductive behavior of the released Crested Ibis in Deqing, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Zoology*, 58(3): 348–356.]
- 邱国强, 姜家虎, 张泽东, 等. 2025. 浙江德清野化放飞朱鹮越冬期的觅食地选择. *野生动物学报*, 46(1): 100–106. [Qiu G Q, Jiang J H, Zhang Z D, et al. 2025. Foraging-site selection of the released Crested Ibis during wintering period in Deqing, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Wildlife*, 46(1): 100–106.]
- 王玄, 江红星, 张亚楠, 等. 2017. 基于稳定同位素技术的辽宁双台河口保护区黑嘴鸥 (*Larus saundersi*) 食性研究. *生态学报*, 37(6): 1796–1804. [Wang X, Jiang H X, Zhang Y N, et al. 2017. Diet composition of Saunders's Gull (*Larus saundersi*) determined using stable isotope analysis at the Shuangtaihekou National Nature Reserve, China. *Acta Ecologica Sinica*, 37(6): 1796–1804.]
- 王玄, 江红星, 张亚楠. 2015. 稳定同位素分析在鸟类食性及营养级结构中的应用. *生态学报*, 35(16): 5556–5569. [Wang X, Jiang H X, Zhang Y N. 2015. Application of stable isotope analyses to avian diets and trophic structure. *Acta Ecologica Sinica*, 35(16): 5556–5569.]
- 徐承香, 赵璐, 杜维锋, 等. 2021. 贵州荔波玉屏洞穴陆生动物食物来源及营养级. *生物多样性*, 29(8): 1108–1119. [Xu C X, Zhao L, Du W F, et al. 2021. Food sources and trophic levels of terrestrial cave fauna in Yuping Town, Libo County, Guizhou Province. *Biodiversity Science*, 29(8): 1108–1119.]
- 张璇, 华宁, 汤臣栋, 等. 2013. 崇明东滩黑腹滨鹬 (*Calidris alpina*) 食物来源和组成的稳定同位素分析. *复旦学报: 自然科学版*, 52(1): 112–118. [Zhang X, Hua N, Tang C D, et al. 2013. Food composition and sources of Dunlinsb (*Calidris alpina*) at Chongming Dongtan: stable isotope analysis. *Journal of Fudan University: Natural Science*, 52(1): 112–118.]