

王玄, 王磊, 王雪, 等. 水鸟食性研究方法与发展趋势[J]. 湿地科学, 2025, 23(4): 825-833. [Wang X, Wang L, Wang X, et al. Review of waterbirds feeding habits and development of research methods. Wetland Science, 2025, 23(4): 825-833.] DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.20240034; CSTR: 32178.14.wetlandscience.20240034

水鸟食性研究方法与发展趋势

王玄^{1,2}, 王磊^{1,2}, 王雪^{1,2}, 丁晶晶^{1,2*}

(1. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153; 2. 江苏盐城滨海湿地生态系统定位观测研究站, 江苏 盐城 224000)

摘要: 食性研究是鸟类生态学研究的基础, 通过与多学科领域科学问题的结合, 可以解决更多交叉学科的热点问题。本文对国内外水鸟食性研究的相关文献进行了总结, 从不同研究方法的样品采集与保存、实验处理、数据分析及应用等方面进行总结和评价, 并概述了国内外湿地鸟类食性研究的进展和发展趋势。国内外水鸟食性研究的传统方法有直接观察法、嗉囊及胃内容物鉴定法、粪便显微分析等。随着科学技术的进步, DNA分析法和稳定同位素分析法受到鸟类学家的青睐。DNA分析法对食物种类的鉴定具有较高的精度, 但存在样本DNA易降解和检测费用高等缺陷。稳定同位素分析法不仅可用于研究水鸟食物组成, 还在示踪鸟类迁徙、探究水鸟食性的季节性变化、划分生态系统的营养级结构、指导种群管理和湿地恢复等方面展示了较大发展前景。在全球气候变化背景下, 水鸟食性研究对于水鸟食性适应机制、肠道微生物与食性的关系、古生物进化、栖息地营造与修复等领域的研究具有重要意义。

关键词: 水鸟; 食物组成; 食性研究; 稳定性同位素

中图分类号: Q958.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5948(2025)04-825-09

食性是野生动物与栖息环境之间关系研究的重要内容之一, 是评估动物环境容纳量、生境质量评价^[1]、生境选择^[2]、生态系统营养级^[3]和种间关系^[4]等群落生态学的基础。在濒危物种保护和资源管理中, 食性一直是关注的热点之一^[5]。

食性研究很早就受到了鸟类学家的高度重视^[6]。水鸟作为鸟类中的一个大家群, 是湿地生态系统中的高等生物类群^[7]。水鸟的食性信息能够反映其与环境的相互关系以及在生态系统能量流转中的作用^[1], 同时也为水鸟尤其是濒危物种的迁地保护和人工繁育等提供了理论依据^[8-9]。水鸟食性研究方法众多, 按研究的样品可分为嗉囊和胃内容物分析法^[10]、呕吐物和食丸分析法^[11]、粪便显微分析法^[12]等; 按分析技术可分为直接观察法、解剖镜分类鉴定法、显微分析法^[12]、DNA宏条形码技术^[13]和稳定同位素分析法^[14]; 按分析手段分为损伤性

研究和非损伤研究; 按研究结果精度可分为定性研究和定量研究。

本文对当前国内外鸟类食性研究方法做了归纳总结, 并对各研究方法进行了简要评价和展望, 以期鸟类学研究者提供快速了解鸟类食性研究现状的渠道。

1 常用样品类别与收集方法

1.1 嗉囊和胃内容物

水鸟的嗉囊、胃等器官中储存了大量未被消化的食物残渣, 如骨骼、贝壳、外骨骼、昆虫口器、植物种子、种皮和叶柄叶脉等粗纤维, 这些食物残渣是水鸟食性研究中常见的材料^[10]。常见的样品采集方法有洗胃或催吐^[15]、拾捡死鸟或捕杀活体^[10](表1)。

1.1.1 洗胃或催吐

对于一些海鸟, 可通过洗胃的方式获取其嗉

收稿日期: 2024-01-24; 修订日期: 2024-04-29

基金项目: 江苏省林业科技创新与推广项目 (LYKJ[2023]08、LYKJ[2020]21) 和江苏省林业科学研究院青年基金项目 (JAF-2022-01) 资助。

[Foundation: Jiangsu Forestry Science and Technology Innovation and Promotion Project (LYKJ[2023]08, LYKJ[2020]21), and Jiangsu Academy of Forestry Youth Foundation (JAF-2022-01).]

作者简介: 王玄 (1990—), 男, 江苏省泗洪人, 工程师, 从事动物生态学研究。Email: xuanzaiwang@163.com

*通信作者: 丁晶晶, 研究员。E-mail: sunshinedjj@163.com

表 1 鸟类食性研究的样品类别和处理方法

Table 1 Sample categories and processing methods for studying feeding habits of birds

样品类别	样品收集方法	样品保存方式	可选择的研究方法
嗦囊和胃内容物	洗胃、催吐; 捕杀或捡拾死鸟	冷冻或干燥	显微镜分析法
呕吐物和食丸	在巢址附近收集, 雏鸟扎颈法	冷冻或干燥	解剖镜分类鉴定法
粪便	捡拾, 肛拭子	冷冻保存, 缓冲液保存	显微镜分析法; DNA分析
血液、肌肉和羽毛等	捕捉采集	冷冻保存, 羽毛也可干燥保存	稳定同位素分析

囊和胃内容物, 具体做法是: 用一根注射器抽满生理盐水, 取一根软管一端连接注射器, 另一端插入水鸟食道; 将水鸟倒挂, 慢慢推进注射器让水流冲洗食道, 将流出的食物用容器收集保存^[16]; 重复以上步骤确保水鸟消化道内容物被冲洗出, 如在冬季或寒冷地区, 需用温水冲洗^[17]。洗胃对鸟类会造成一定伤害, 尤其是捕食能力较差的幼鸟, 故洗胃后应及时饲喂水鸟以补充能量, 洗胃操作的技术难度较大, 更有效的方法是使用催吐药, 但催吐药对水鸟伤害更大, 一般很少使用^[18]。

1.1.2 捕杀或捡拾死鸟

捕杀鸟类和捡拾死鸟均是获取个体嗦囊和胃内容物的最直接途径。前者为损伤性采样, 一般不建议采用。后者为非损伤性采样方法, 但在野外收集新鲜鸟类尸体的概率较低, 获取的样本量难以确保数据的准确性^[10]。

1.2 呕吐物和食丸

1.2.1 呕吐物

有些鸟类有反吐的习性, 如鸥类, 在夜间飞行遇到光线照射时会停在甲板上或着陆, 为了减轻体重或对惊吓的反应, 会呕吐出上消化道的食物^[19], 黑嘴鸥 (*Saundersilarus saundersi*) 雏鸟在繁殖地巢附近被捕捉时也会出现呕吐现象^[20]。除此之外, 普通鸬鹚 (*Phalacrocorax carbo*)、鹭类、鸛类等也有反吐行为, 取食的食物暂时储存在嗦囊或食道内然后返回巢址, 再将食物反吐喂给幼鸟^[19]。被反吐出的食物中通常含有不易消化的毛发、耳石、骨等^[11], 但鸟类反吐的食物并不能完全代表食性, 因为有部分易消化食物已被消化吸收, 同时不排除一些水鸟对某些特定食物反应强烈而增加反吐几率, 从而造成食性分析的较大误差。

1.2.2 食丸

部分食物被鸟类取食后不能被完全消化吸收, 且不能通过泄殖腔排出体外, 而以食丸的形式被反吐出来^[19], 如普通鸬鹚、鸥类、鸛鹬类、鹭科鸟类等。食丸的组成取决于水鸟的食性, 食丸中

常见的成分有昆虫的外骨骼、难消化的植物组织、骨头、毛皮、羽毛、喙、爪、牙齿等。鸛鹬类有拔自身羽毛并将其吃入胃中的习性, 羽毛将食物裹成若干小的食团以增大消化吸收面积, 还能保护胃壁免受尖锐鱼刺的伤害, 再次进食前需将未被消化的食物包裹成团并吐出^[19]。食丸收集属于无损研究, 但食丸的采集常常受到繁殖地和栖息地的限制, 例如, 鸥类常在栖息地混群, 无法界定采集的食丸属于哪一物种, 采集前必须选择好采样地点^[21]。通过食丸分析能够较好地确定水鸟部分未消化食物的组成, 而不能定量确定水鸟食物的比例。

1.3 粪便

由于鸟类代谢迅速, 食物在消化道内的停留时间相较其他动物短^[19], 因此粪便中常含有难消化的植物种子或种皮、叶柄、高纤维的叶片残体、动物骨骼、毛发、牙齿、几丁质外骨骼、鳞片、贝壳等^[10], 为鸟类食性研究提供了可能。野外较难通过粪便样品确定排便的水鸟种类, 因此可借助观察法, 选择单一种群较为集中的觅食地或栖息地进行采集。也可对环志鸟类或通过其他方式捕捉的鸟类进行粪便采样。雏鸟则可在其巢址范围内采样, 也可捕捉后采样。

1.4 血液、肌肉和羽毛

血液、肌肉和羽毛是间接的食性研究样品, 通过分析血液、组织和羽毛的稳定性同位素比率, 可定量得到动物同化食物的百分比^[22]。水鸟组织和血液样品的获取有 2 种途径, 最常见的是捕捉活体鸟类, 取其组织或血液。另一种方法是捡拾新鲜的死鸟, 收集其羽毛等组织^[23]。此外, 许多水鸟有换羽行为, 为避免采样时物种间的混淆, 可在单一水鸟种群的觅食地或栖息地收集羽毛样品。

2 样品的保存

2.1 低温或冷冻保存

低温保存 (4 °C) 是一种短暂的保存方法, 冷

冻保存是将样品放置于 -20°C 温度下保存,目的是防止样品腐烂变质,保持样品的新鲜度。野外很难在 -20°C 温度条件下获得样品,一般在采集样品 2 h 内低温保存,再转到 -20°C 条件下继续保存^[24],长期保存样品可 -80°C 保存或利用液氮保存。

2.2 烘干或干燥保存

烘干法是将样品放置于 60°C 烘箱中 24 h 以除去样品中的水分,防止样品发生腐烂或霉变^[25]。当在野外很难获得冷冻条件时,烘干保存是很好的替代方法^[10,25]。此外,干燥剂也可以达到保存的目的,常用的干燥剂有硅珠 (Silica beads)、 CaSO_4 ^[26] 等。

2.3 溶剂或缓冲液保存

溶剂浸泡保存是将样品浸泡在可消毒杀菌的溶剂中以达到防腐的目的。常用的溶剂有 70% 乙醇和福尔马林溶液。乙醇容易使食物组织褪色而影响对食物的判断^[10],此外,乙醇还会混淆食物中碳稳定同位素的比率^[27]。福尔马林主要通过蛋白质变性来达到防腐的目的,同时,福尔马林也会改变样品的同位素比率^[28-29],因此可依据不同的研究手段选择合适的保存液。

缓冲液保存是为了防止样品 DNA 降解,常用的有 DETs 缓冲液^[30]、Tris-HCL 缓冲液^[31] 等,主要用于保存鸟类咽拭子、肛拭子、粪便等样品。

3 水鸟食性研究常用方法

3.1 直接观察法

直接观察法是用肉眼或借助望远镜、摄像机、夜视镜等工具,直接观察记录鸟类的取食种类、取食方式、取食部位等信息^[32]。直接观察法可直观地得到鸟类的食性、觅食频次、觅食生境、觅食时间等取食信息。该方法能够较为真实地反映鸟类的自然食性^[33]。

3.2 解剖镜分类鉴定法

嗦囊内容物、胃内容物、食丸和呕吐物一般是未经消化、未完全消化或不能被消化的食团,通过肉眼或解剖镜可清楚地识别和分类^[34]。解剖镜分类鉴定法的步骤包括取样、样品冲洗筛选、鉴定和分类^[10]。首先,将胃内容物放在筛网中清洗过滤^[35],选择网眼大小合适的筛网,筛出未被完全消化的甲壳、骨骼、毛发等。将样品烘干后,依据相关图鉴和工具书,在解剖镜下统计内容物的种类及出

现频次^[35]。食丸和呕吐物仅代表水鸟取食的部分内容物,只能作为定性的研究方法,由于食丸和呕吐物消化程度低,大多可直接用肉眼识别鉴定^[36]。

3.3 显微分析法

显微分析法主要是针对植食性鸟类粪便样品的食性研究方法,一般借助显微镜等显微观察设备拍照和分析鸟类粪便以确定其食源组成的研究方法。鸟类取食后,食物经过嗦囊、腺胃、肌胃和肠道的研磨、消化和吸收,大部分食物组织遭到破坏,但植物角质、表皮细胞及部分难以消化的动物性食物基本结构依然会留下痕迹,因此可以依据粪便中残留的细胞组织结构来鉴定鸟类取食的食源种类。鉴定的基本流程包括合理选择保存液并完成粪样和组织样品的制片^[37]、潜在食源样品的细胞和组织样品制片、样品制片的比对和鉴定^[12]。

3.4 DNA 宏条形码技术

DNA 宏条形码技术整合了 DNA 条形码技术和高通量测序技术,实现了对无法观测到形态学特征的混合食物样品的检测^[13]。通过收集粪便、胃内容物、肛拭子、咽拭子等,选取合适的特异性引物对样品的目标 DNA 区域进行扩增,依托高通量测序平台单次实验可以获得上亿条序列数据,该技术能够从含有降解 DNA 的环境样本或含有混合 DNA 的生物样本(土壤、水、粪便等)中鉴别多个物种,在混合食物样品分析中展现了研究潜力^[13-38]。

DNA 宏条形码技术对水鸟食性研究的基本流程如下^[13]:

①食物样本采集(粪便、胃容物等);②提取食物样本中残留的 DNA;③根据潜在的食物类群,选择适当的 DNA 标记,基于选用的 DNA 条形码选择合适的引物;④通过聚合酶链式反应(PCR)扩增,从食物样本中获得扩增子序列;⑤通过高通量测序平台,对 PCR 扩增得到的大量的扩增子序列进行测序;⑥将所测序列进行整理、筛选,并与相关数据库进行比对,确定食物样本所含的物种组成及分类。

3.5 稳定性同位素分析法

稳定性同位素分析法是对鸟类组织水平的食性研究方法,是自 20 世纪 80 年代开始应用于鸟类食性研究的新技术手段,其理论基础是稳定性同位素有规律、稳定地在营养级间流动^[39]。每种动植物体内的稳定性同位素比率存在差异,当动

物取食同化后重同位素在体内富集, 导致稳定 C、N 同位素比率发生变化^[10]。通过检测采集的动物组织、血液、羽毛和潜在食源样品的稳定同位素, 经过数据矫正和软件分析可得到各潜在食源的能量贡献比例^[40-41]。

通过捕捉活体或捡拾新鲜尸体获取组织、血液、羽毛等, 收集可能被水鸟取食的物种, 在实验室内冷冻保存、烘干、研磨和过筛, 血液需冷冻干燥^[14]。检测所用仪器有同位素比率质谱仪和元素分析仪, 所有样品检测 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素比值。稳定同位素检测所需的样品量较少, 仪器进样的干物质质量只需 0.2 mg, 对于部分鸟类可以实现无损伤取样^[20]。模拟食源贡献的分析软件和程序包有 IsoSource、MixSIR 和 SIAR 等^[20], 测定值经富集因子校正后输入模型, 结合传统食性研

究输入先验食性信息, 设置合理的运算迭代等, 即可得到各食源对鸟类能量的贡献情况。

4 不同食性研究方法的评价

4.1 直接观察法的评价

直接观察法操作简单, 是自然状态下鸟类真实取食行为的记录, 既不会对鸟类造成伤害, 也不会对鸟类觅食等行为造成干扰, 只需要基本的观察工具, 如望远镜、照相机等, 不需要复杂的实验设备, 成本相对较低^[33]。其缺点在于无法近距离观察鸟类取食种类, 对某些物种及取食的食物种类判断难度大, 直接观察的结果难以对鸟类食性进行量化分析, 只能提供定性的食性信息, 且观测时间较长, 需要投入较多人力, 长期观察的难度较大(表 2)。

表 2 水鸟食性研究方法的比较

Table 2 Comparison of research methods on feeding habits of waterbirds

研究方法	适用范围	优点	局限性
直接观察法	普适性研究手段	简便易行, 无损伤	费时费力, 距离远时物种难以区别
解剖镜观察法	反吐鸟类和幼鸟	简单快捷	数据量需求大, 需要矫正
显微分析法	粪便容易获取的鸟类	简单快捷	数据量需求大, 需要矫正
DNA宏条形码技术	取食的食源为近缘种, 且不易区分	准确鉴别混合物中的近缘种	测试费用高
稳定同位素分析法	不同取食周期的食性研究	考虑了食源物种的同化比例	测试费用高

4.2 解剖镜分类鉴定法的评价

嗦囊和胃内容物分析法是将动物的胃取出进行分析, 因此不能用于珍稀濒危动物的研究^[42]。在野外可能会发现因自然死亡或伤病的鸟类样品, 但因其数量有限, 死亡时间较长且没有得到较好的保存, 而无法保证嗦囊和胃内容物样品分析结果的可靠性。

胃内容物的分析结果较为直观, 胃内含有鸟类在短时间内取食的所有食物种类。由于鸟类存在偶食现象, 因此, 胃内容物分析法需要获取较大的样品量才能减少因偶食带来的分析误差^[43]。此外, 不同类型的食物在鸟类胃内的消化代谢速率不同, 含水量高且高蛋白的食物如软体动物等易被消化代谢, 因此容易被低估, 而一些含有骨骼、毛发等的食物不易被消化, 则易被高估, 因此, 胃内容物分析法往往需要数据校正才能准确反映鸟类的食性信息^[44]。

肉食性或杂食性的水鸟如普通鸬鹚等, 取食的鱼的消化道内也常包含食物成分, 这样就造成

二次消费, 食性研究收集的食丸、嗦囊、胃内容物、反吐呕吐物甚至粪便中都有可能含有鱼、昆虫等被捕食动物的食物成分^[45]。因此, 嗦囊和胃内容物的方法也会存在结果的偏差。

4.3 显微分析法的评价

粪便显微分析法于 20 世纪 30 年代首次被提出, 最早用于大型肉食性动物食性研究。20 世纪 70 年代, 被广泛用于野生动物食性研究^[46]。该法取样方便且对动物干扰较小, 在水鸟食性研究中得到了广泛应用^[47], 也是目前多数学者公认的一种较为可靠和实用的方法。

显微分析法能够准确鉴定出鸟类摄取的食物种类和组成, 因为它直接对鸟类的胃内容物或粪便进行分析, 能够直接反映鸟类的实际食性。但该方法识别的基础是收集的鸟类粪便中存在未消化完全或存在可辨别的角质表皮碎片, 较多地用于植食性鸟类食性研究, 而较少用于肉食性或杂食性鸟类食性研究^[48], 容易因鸟类消化速率或消化能力的不同而低估一些软体类动物等食物的

取食比例。

4.4 DNA 宏条形码技术的评价

利用 DNA 宏条形码技术研究鸟类食性是一种非损伤性取样的研究方法,且粪便材料相对于胃内容物、呕吐物等更容易被获取,经简单处理后可以长时间保存^[49]。DNA 宏条形码技术的技术难度高,需要对混合样品的 DNA 序列进行扩增后与物种特有的一段序列进行比对,以确定粪便样品中包含的食物种类信息。DNA 测序的费用相对较高,但随着技术的进步,其价格有所降低,为 DNA 宏条形码技术的应用和推广提供了便利。对于那些消化程度高且无法通过解剖镜分析和显微分析的样品,PCR 扩增成为了可替代的较为快捷高效的食性研究方法。因此,近年来 DNA 宏条形码技术被广泛应用于食性研究等物种鉴定方面^[13,50]。

此外, DNA 宏条形码技术在确定鸟类食性中也存在一定的局限性。①食物样品不新鲜或保存不当造成粪便样品中 DNA 不同程度的降解,在扩增的过程中会出现结果的偏差^[51];②检测结果只能定性确定粪便样品中各食源的种类,无法根据扩增或测序中物种的丰度来确定鸟类取食的食源比例^[52-53];③因测试费用高无法完成大量实验样品的重复工作,该方法分析的食源样品组成一般作为其他食性分析的补充。

4.5 稳定性同位素分析法的评价

稳定性同位素分析方法为鸟类食性研究提供了一种新的手段。自 20 世纪 70 年代引入生态学领域后受到学者的重视和肯定,已开展了系列研究,如分析动物的食性、营养级、食物链结构、鸟类迁徙、恢复和重建原生境等^[54]。

在传统的胃内容物或粪便显微分析中,动物所取食的食物并非全部被机体消化吸收,因此存在很大的偶食性,且胃内容物和粪便所反映的是水鸟短时间内的取食,稳定性同位素分析方法成功克服了这一局限,该方法仅需动物组织的 0.2 mg 干物质样品就可以反映水鸟较长一段时间的食性特征^[55]。

同位素研究的样品类型很多,如肌肉、血液、骨骼、爪、羽毛等。因为不同组织新陈代谢速度有差异,不同样品可以反映不同时间尺度的食性信息。骨骼、爪、羽毛等反映的是水鸟长期的食性信息^[56],血液代谢速率最快,反映的是短时间的食性信息^[57]。同位素在体内各组织内代谢速度差别较

大,因此在使用稳定性同位素分析方法前,应先根据不同的研究目的确定合适的样品和样品的同位素变化周期^[54]。

稳定性同位素分析技术为检验生态学中的一些基本原理提供了很好的方法,但也存在一些问题,虽可直接利用现存的食物材料来推测过去的食物组成,但无法确定食物的同位素比率是否一直保持不变。在过去的一段时间内捕食者的营养级可能发生了很大变化,被捕食者的食性或同位素特征值同样也可能发生了很大变化^[58]。即使以前的潜在食源样品是可获得的,也会因保存技术的缺陷而使同位素比率发生变化^[59]。在样品采集时,常因采集了非代表性的样本而使稳定性同位素分析结果与实际食物比例产生较大偏离。成鸟与幼鸟、繁殖鸟类与非繁殖鸟类、雌雄二形与单形的雄鸟与雌鸟等在代谢能力和同位素分馏上都有差异。幼鸟消化能力与成鸟不同,幼鸟偏好取食易消化的食物种类,因此,成鸟与幼鸟的食物组成存在差异^[60];参加繁殖的成鸟和未参加繁殖的成鸟的食性也存在差异,参加繁殖的成鸟有哺育幼鸟的任务,且产卵期雌鸟为了促进蛋壳的形成,会偏向于取食贝类等高钙含量的食物^[61],因此,繁殖鸟类取食种类和取食量不同于其他成鸟^[62]。

5 水鸟食性研究进展与展望

食物、水和隐蔽物是动物生存的三大要素^[63],在气候变化背景下,鸟类栖息地面临破坏和丧失的风险,进而导致鸟类食物链中断,种群数量面临下降风险^[64]。食性研究因能将鸟类与生态系统中其他生物联系起来而受到重视。水鸟食性的研究方法有从定性到定量的发展趋势,经历了直接观察法、解剖镜观察法、显微分析法、稳定性同位素分析法和分子分析法等过程。食性研究的目的也从单一的了解水鸟的食物组成发展到水鸟食性的时空变化、水鸟栖息生境的恢复、候鸟的迁徙等方面。通过上文对水鸟食性研究方法的综述, DNA 宏条形码技术和稳定性同位素技术在分析鸟类食性的季节性变化、迁徙鸟类在繁殖地中途停歇地和越冬地的食性变化、鸟类分布与环境之间的关系等方面为研究者提供了准确可靠的数据。

国内最早的鸟类食性研究是 20 世纪 30 年代郑作新等^[65]通过观察法对雀形目鸟类食性进行研究。最初的鸟类食性研究只是研究鸟类取食的食

物种种类和比例,如20世纪50年代初在中国人口增长与粮食短缺的社会背景下,麻雀被定位为“四害”之一,郑作新先生对大量的农林鸟类尤其是麻雀(*Passer montanus*)进行胃内容物分析并指导如何对待益鸟与害鸟^[66-67],引发了全国关于益鸟与害鸟的讨论^[68],1959年麻雀被移出“四害”名单,鸟类学家成功地通过食性研究避免了麻雀等鸟类灭绝的风险。随着研究的深入,鸟类食性研究逐渐与多个学科领域科学问题相结合,利用生态学、遗传学、生理学、分子生物学等多学科手段,更全面地研究水鸟的食性适应机制及其对全球气候变化的响应^[64,69]。此外,在肠道微生物与食性的关系^[70]、古鸟类食性及进化^[71]、迁徙与食性的关系^[72]、保护区规划与管理^[73]、湿地恢复与栖息地营造^[74-75]等方面,水鸟食性研究发挥了重要作用。随着科技水平的进步、分析手段的完善和科学工作者的不懈努力,水鸟食性研究将得到更加广泛和深入的应用。

参考文献

- [1]李祎可,王强,李星醇,等.边缘效应对湿地中鸟类的影响机制研究进展[J].湿地科学,2022,20(5):613-621. [Li Y K, Wang Q, Li X C. et al. Progress on the impact mechanism of edge effect on birds in wetlands. Wetland Science, 2022, 20(5): 613-621.]
- [2]殷鲁秦,王成,韩文静.基于取食行为探究北京居民区鸟类的食源特征及多样性[J].生物多样性,2023,31(5):22473. [Yin L Q, Wang C, Han W J. Food source characteristics and diversity of birds based on feeding behavior in residential areas of Beijing. Biodiversity Science, 2023, 31(5): 22473.]
- [3]张波,唐启升,金显仕.黄海生态系统高营养层次生物群落功能群及其主要种类[J].生态学报,2009,29(3):1099-1111. [Zhang B, Tang Q S, Jin X S. Functional groups of communities and their major species at high trophic level in the Yellow Sea ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1099-1111.]
- [4]王昱熙,谢彦波, Batbayar N, 等.基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状[J].生物多样性,2020,28(12):1483-1495. [Wang Y X, Xie Y B, Batbayar N, et al. Discussion of existing protection for three waterbirds' habitats in the Yellow River Basin Nature Reserves, based on satellite tracking. Biodiversity Science, 2020, 28(12): 1483-1495.]
- [5]王勇,张正旺,郑光美,等.鸟类学研究:过去二十年的回顾和对中国未来发展的建议[J].生物多样性,2012,20(2):119-137. [Wang Y, Zhang Z W, Zheng G M, et al. Ornithological research: past twenty years and future perspectives in China. Biodiversity Science, 2012, 20(2): 119-137.]
- [6]郑光美.我国鸟类生态学的回顾与展望[J].动物学杂志,1981,1:63-68. [Zheng G M. Review and prospect of bird ecology in China. Chinese Journal of Zoology, 1981, 1: 63-68.]
- [7]李秀明,程瑞梅,肖文发,等.水鸟监测:历史与现状及其在中国未来发展的建议[J].湿地科学,2020,18(6):633-645. [Li X M, Chen R M, Xiao W F, et al. Waterbird monitoring: history, status and future perspectives in China. Wetland science, 2020, 18(6): 633-645.]
- [8]贾海燕,刘晓青,田农夫,等.藏雪鸡(*Tetraogallus tibetanus*)春夏季食性[J].生态学报,2021,40(2):470. [Jia H Y, Liu X Q, Tian N F, et al. Spring and summer diet composition of Tibetan snowcocks. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(2): 470-479.]
- [9]吕士成.盐城沿海滩涂丹顶鹤的分布现状及其趋势分析[J].生态科学,2008,27(3):154-158. [Lyu S C. Current distribution of red crown crane and its development trends in Yancheng Coastal Marshes. Ecological Science, 2008, 27(3): 154-158.]
- [10]Barrett R T, Camphuysen C J, Anker-Nilssen T, et al. Diet studies of seabirds, a review and recommendations[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64: 1675-1691.
- [11]Jobling M, Breiby A. The use and abuse of fish otoliths in studies of feeding habits of marine piscivores[J]. Sarsia, 1986, 71(3/4): 265-274.
- [12]Sparks D R, Malechek J C. Estimating percentage dry weight in diets using a microscopic technique[J]. Journal of Range Management Archives, 2006, 21(4): 264-265.
- [13]张珺楠,卢欣. DNA 宏条形码技术在鸟类食性分析中的运用[J].生物资源,2023,45(4):321-327. [Zhang J N, Lu X. Application of DNA metabarcoding technology in avian dietary analysis. Biotic Resources, 2023, 45(4): 321-327.]
- [14]王玄,江红星,张亚楠.稳定同位素分析在鸟类食性及营养级结构中的应用[J].生态学报,2015,35(16):5556-5569. [Wang X, Jiang H X, Zhang Y N. Application of stable isotope analyses to avian diets and trophic structure. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5556-5569.]
- [15]Aldana-Ardila O, Carlos C J. Feeding ecology of the Chilean Flamingo *Phoenicopterus chilensis* (Aves: Phoenicopteridae) in a coastal wetland in southern Brazil[J]. Journal of Natural History, 2021, 55(41/42): 2589-2603.
- [16]Wilson R. An improved stomach pump for penquins and other seabirds[J]. Journal of Field Ornithology, 1984, 55(1): 109-112.
- [17]Neves V C, Bolton M, Monteiro L R. Validation of the water offloading technique for diet assessment: an experimental study with Cory's shearwaters (*Calonectris diomedea*)[J]. Journal of Ornithology, 2006, 147(3): 474-478.
- [18]Ryan P G, Jackson S. Stomach pumping: is killing seabirds necessary?[J]. The Auk, 1986, 103(2): 427-428.
- [19]郑光美.鸟类学[M].2版.北京:北京师范大学出版社,2012. [Zheng G M. Ornithology. 2nd ed. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 2012.]
- [20]王玄,江红星,张亚楠,等.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[J].生态学报,2017,37(6):1796-1804. [Wang X, Jiang H X, Zhang Y N, et al. Diet composition of Saunders's Gull (*Larus saundersi*) determined using stable isotope analysis at the Shuangtaihekou National Nature Reserve, China. Acta

- Ecologica Sinica, 2017, 37(6): 1796-1804.]
- [21] Kawakami K, Fujita M, Hasegawa M, et al. Dietary characteristics of the Malayan Night Heron (*Gorsachius melanolophus*) in the Yaeyama Islands, southern Japan[J]. *Chinese Birds*, 2011, 2(2): 87-93.
- [22] Phillips D L, Gregg J W. Uncertainty in source partitioning using stable isotopes[J]. *Oecologia*, 2001, 127(2): 171-179.
- [23] Hobson K A, Piatt J F, Pitocchelli J. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships[J]. *Journal of animal ecology*, 1994, 63(4): 786-798.
- [24] Constable J, Packer C, Collins D, et al. Nuclear DNA from primate dung[J]. *Nature*, 1995, 373(6513): 393.
- [25] 张璇, 华宁, 汤臣栋, 等. 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[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2013(1): 112-118. [Zhang X, Hua N, Tang C D, et al. Food composition and source of Dunlins (*Calidris alpina*) at Chongming Dongtan: stable isotope analysis. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2013(1): 112-118.]
- [26] Wasser S, Houston C, Koehler G M, et al. Techniques for application of faecal DNA methods to field studies of Ursids[J]. *Molecular Ecology*, 1997, 6(11): 1091-1097.
- [27] Kaehler S, Pakhomov E. Effects of storage and preservation on the ¹³C and ¹⁵N signatures of selected marine organisms[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 219: 299-304.
- [28] Gloutney M L, Hobson K A. Field preservation techniques for the analysis of stable-carbon and nitrogen isotope ratios in eggs[J]. *Journal of Field Ornithology*, 1998, 69(2): 223-227.
- [29] Hobson K A, Gloutney M L, Gibbs H L. Preservation of blood and tissue samples for stable-carbon and stable-nitrogen isotope analysis[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1997, 75(10): 1720-1723.
- [30] Frantzen M, Silk J, Ferguson J, et al. Empirical evaluation of preservation methods for faecal DNA[J]. *Molecular Ecology*, 1998, 7(10): 1423-1428.
- [31] Chen J, Wang X, Shao Y, et al. A trinuclear copper (II) complex of 2, 4, 6-tris (di-2-pyridylamine)-1, 3, 5-triazine shows prominent DNA cleavage activity[J]. *Inorganic Chemistry*, 2007, 46(8): 3306-3312.
- [32] 孙承骞, 冯宁, 张哲邻. 红碱滩遗鸥繁殖、食性及同类相食行为初探[J]. 野生动物, 2007, 28(5): 27-29. [Sun C Q, Feng N, Zhang Z L. Breeding, diet and cannibalism of Ralic Gull (*Larus relictus*) in breeding season in Hongjiannao Lake. *Chinese Journal of Wildlife*, 2007, 28(5): 27-29.]
- [33] 冯晨晨, 张守栋, 刘文亮, 等. 丹东鸭绿江口湿地春季 5 种迁徙鹬类的食物组成[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2019, 58(4): 497-505. [Feng C C, Zhang S D, Liu W L, et al. Food composition of five migratory shorebirds at the Dandong Yalu River coastal wetland in spring migration. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2019, 58(4): 497-505.]
- [34] 崔志兴, 钱国桢, 祝龙彪, 等. 鸻形目鸟类的食性研究[J]. 动物学研究, 1985, 6(4): 43-51. [Cui Z X, Qian G Z, Zhu L B, et al. A preliminary report of feeding ecology on shorebirds (Charadriiformes). *Zoological Research*, 1985, 6(4): 43-51.]
- [35] Remonti L, Balestrieri A, Domenis L, et al. Red fox (*Vulpes vulpes*) cannibalistic behaviour and the prevalence of *Trichinella britovi* in NW Italian Alps. [J]. *Parasitology Research*, 2005, 97(6): 431-435.
- [36] Duffy D C, Jackson S. Diet studies of seabirds: a review of methods[J]. *Colonial Waterbirds*, 1986, 9: 1-17.
- [37] Fitzgerald A E, Waddington D. Comparison of two methods of fecal analysis of herbivore diet[J]. *The Journal of Wildlife Management*, 1979: 468-473.
- [38] 肖文宏, 周青松, 朱朝东, 等. 野生动物监测技术和方法应用进展与展望[J]. 植物生态学报, 2020, 44(4): 409-417. [Xiao W H, Zhou Q S, Zhu C D, et al. Advances in techniques and methods of wildlife monitoring. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(4): 409-417.]
- [39] Hobson K A. Trophic relationships among high Arctic seabirds: insights from tissue-dependent stable-isotope models[J]. *Marine Ecology Progress Series* 1993, 95: 7-18.
- [40] Phillips D L, Newsome S D, Gregg J W. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods[J]. *Oecologia*, 2005, 144(4): 520-527.
- [41] 刘博. 黄河三角洲典型滨鸟食性特征的时空差异性研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2019. [Liu B. Investigations on the seasonal and spatial variations in feeding behavior of typical shorebirds in the Yellow River Delta, China. Yantai: Yantai University, 2019.]
- [42] Contesse P, Hegglin D, Gloor S, et al. The diet of urban foxes (*Vulpes vulpes*) and the availability of anthropogenic food in the city of Zurich, Switzerland[J]. *Mammalian Biology-Zeitschrift für Säugetierkunde*, 2004, 69(2): 81-95.
- [43] 关蕾. 水文情势变化对洞庭湖雁类食物资源和分布的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015. [Guan L. Potential impact of changed hydrology regime on food resource and distribution of wintering geese in Dongting Lake, China. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.]
- [44] 蔡德陵, 张淑芳, 张经. 天然存在的碳、氮稳定同位素在生态系统研究中的应用[J]. 质谱学报, 2003, 24(3): 434-440. [Cai D L, Zhang S F, Zhang J. Ecosystem trophic dynamics studies as traced by natural carbon and nitrogen stable isotopes. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2003, 24(3): 434-440.]
- [45] Arnett R T, Whelan J. Comparing the diet of cod (*Gadus morhua*) and grey seals (*Halichoerus grypus*): an investigation of secondary ingestion[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 2001, 81: 365-366.
- [46] Hobbs N T. Fecal indices to dietary quality: a critique[J]. *The Journal of Wildlife Management*, 1987, 51(2): 317-320.
- [47] 董翠玲, 齐晓丽, 刘建. 荣成天鹅湖湿地越冬大天鹅食性分析[J]. 动物学杂志, 2007, 42(6): 53-56. [Dong C L, Qi X L, Liu J. Food habits of Whooper Swan in winter at the Tian'ehu of Rongcheng. *Chinese Journal of Zoology*, 2007, 42(6): 53-56.]
- [48] Zhang X, Hua N, Ma Q, et al. Diet of Great Knots (*Calidris tenuirostris*) during spring stopover at Chongming Dongtan, China[J]. *Chinese Birds*, 2011, 2(1): 27-32.
- [49] 刘丙万, 蒋志刚. 粪样在野生动物研究中的作用[J]. 动物学研究, 2002, 23(1): 71-76. [Liu B W, Jiang Z G. Feces analysis and its role in wildlife research. *Zoological Research*, 2002, 23(1): 71-76.]

- [50]黄涛. 基于 DNA 宏条形码技术分析双流机场鸟击高危鸟类食性[D]. 成都: 四川农业大学, 2020. [Huang T. Diet analysis of high-risk birds in Shuangliu airport based on DNA metabarcoding. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.]
- [51]Deagle B E, Chiaradia A, McInnes J, et al. Pyrosequencing faecal DNA to determine diet of little penguins: is what goes in what comes out?[J]. *Conservation Genetics*, 2010, 11: 2039-2048.
- [52]Deagle B E, Tollit D J. Quantitative analysis of prey DNA in pinniped faeces: potential to estimate diet composition?[J]. *Conservation Genetics*, 2007, 8: 743-747.
- [53]Michael H, Robert K. Facts from feces revisited[J]. *Tree*, 1997, 12(6): 223-227.
- [54]Bond A L, Jones I. A practical introduction to stable-isotope analysis for seabird biologists: approaches, cautions and caveats[J]. *Mar Ornithol*, 2009, 37: 183-188.
- [55]Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18: 293-320.
- [56]Bearhop S, Furness R, Hilton G, et al. A forensic approach to understanding diet and habitat use from stable isotope analysis of (avian) claw material[J]. *Functional Ecology*, 2003, 17(2): 270-275.
- [57]易现峰, 张晓爱. 稳定性同位素技术在生态学上的应用[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 306-314. [Yi X F, Zhang X A. Application of stable isotopic approach in ecology. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 306-314.]
- [58]Quay P, Sonnerup R, Westby T, et al. Changes in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in the ocean as a tracer of anthropogenic CO_2 uptake[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(1): 1004.
- [59]Hobson K A, Wassenaar L I. Linking breeding and wintering grounds of neotropical migrant songbirds using stable hydrogen isotopic analysis of feathers[J]. *Oecologia*, 1996, 109(1): 142-148.
- [60]Dierschke A, Hüppop O. Langfristige Veränderungen in der ernährung von silbermöwen (*Larus argentatus*) auf helgoland unter dem einfluss der fischerei mit vergleichen zur Heringsmöwe (*Larus fuscus*)[J]. *Seevö Gel*, 2003, 24: 3-15.
- [61]Niebuhr V. Feeding strategies and incubation behaviour of wild herring gulls: an experiment using operant feeding boxes[J]. *Animal Behaviour*, 1983, 31(3): 708-717.
- [62]Keyl G, Roomen M W, Veldhuijzen V Z. Voedseloecologie van de Stormmeeuw (*Larus canus*) te Schoorl in 1986: Voedselkeuze en fourageerritme in de periode dat de jongen worden grootgebracht[D]. Haarlem: Hogescholl Holland, 1987.
- [63]宋延龄, 杨亲二, 黄永青. 物种多样性研究与保护[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1998. [Song Y L, Yang Q E, Huang S Q. Research and conservation of diversity. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 1998.]
- [64]吴伟伟, 徐海根, 吴军, 等. 气候变化对鸟类影响的研究进展[J]. *生物多样性*, 2012, 20(1): 108-115. [Wu W W, Xu H G, Wu J, et al. The impact of climate change on birds: a review. *Biodiversity Science*, 2012, 20(1): 108-115.]
- [65]郑作新. 我国鸟类学三十年来的发展(1934—1964)[J]. *动物学杂志*, 1964, 6: 246-247. [Zheng Z X. The Development of ornithology in China over the past thirty years (1934-1964). *Chinese Journal of Ecology*, 1964, 6: 246-247.]
- [66]郑作新. 农林的益鸟和害鸟[J]. *生物学通报*, 1956, 5: 8-11. [Zheng Z X. Beneficial and harmful birds in agriculture and forestry. *Bulletin of Biology*, 1956, 5: 8-11.]
- [67]郑作新, 贾相刚, 傅守三, 等. 麻雀 (*Passer montanus saturatus*) 食物分析的初步报告[J]. *动物学报*, 1957, 9(3): 255-266. [Zheng Z X, Jia X G, Fu S S, et al. Preliminary report on food analysis of sparrow (*Passer montanus saturatus*). *Acta Zoologica Sinica*, 1957, 9(3): 255-266.]
- [68]李佩珣, 虞快. 围剿麻雀必须重视农林益鸟的保护[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1959, 3: 84-91. [Li P X, Yu K. Importance must be attached to the protection of beneficial birds in agriculture and forestry in the encirclement and suppression of sparrows. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 1959, 3: 84-91.]
- [69]张强, 马克明, 李金亚, 等. 不同尺度下停歇点湿地对迁徙水鸟的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2520-2529. [Zhang Q, Ma K M, Li J Y, et al. The effect of stopover wetlands on migratory waterbirds at different scales: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2520-2529.]
- [70]王娟, 高泽中, 蒋一婷, 等. 不同食性野生鸟类肠道微生物研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 7939-7945. [Wang J, Gao Z Z, Jiang Y T, et al. Research advances in the intestinal microbes in wildbirds with different feeding habits. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 7939-7945.]
- [71]Wu Y, Ge Y, Hu H, et al. Intra-gastric phytoliths provide evidence for folivory in basal avialans of the Early Cretaceous Jehol Biota[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4558.
- [72]阎理钦, 张英, 耿德江, 等. 山东湿地水鸟食性和迁徙规律的研究[J]. *湿地科学与管理*, 2006, 2(2): 38-40. [Yan L Q, Zhang Y, Gen D J, et al. Feeding habits and migration patterns of wetland water birds in Shandong. *Wetland Science and Management*, 2006, 2(2): 38-40.]
- [73]杨萍, 杨永峰, 杨宜男, 等. 基于鸟类栖息地季节性变化的自然保护区动态分区管理: 以安徽升金湖国家级自然保护区为例[J]. *生态学报*, 2023, 43(22): 9206-9217. [Yang P, Yang Y F, Yang Y N, et al. Dynamic zoning of nature reserves based on seasonal changes in bird habitats: Shengjin Lake National Nature Reserve, Anhui Province as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(22): 9206-9217.]
- [74]解雪峰, 孙晓敏, 吴涛, 等. 互花米草入侵对滨海湿地生态系统的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2119-2128. [Xie X F, Sun X M, Wu T, et al. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on coastal wetland ecosystem: advances and prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2119-2128.]
- [75]严少君, 朱曦, 俞益武. 华中区城市型鹭鸟栖息地营建技术[J]. *浙江林学院学报*, 2006, 23(6): 697-700. [Yan S J, Zhu X, Yu Y W. Construction techniques for the city heronries in Central China. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2006, 23(6): 697-700.]

Review of waterbirds feeding habits and development of research methods

Wang Xuan^{1,2}, Wang Lei^{1,2}, Wang Xue^{1,2}, Ding Jingjing^{1,2}

(1. *Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, Jiangsu, P.R.China*; 2. *Yancheng Wetland Ecosystem Research Station of Jiangsu Province, Yancheng 224000, Jiangsu, P.R.China*)

Abstract: Dietary ecology is fundamental to understanding wildlife-habitat interactions, serving as a cornerstone for assessing environmental carrying capacity, habitat quality, habitat selection behavior, trophic structure, and interspecific competition/mutualism in community ecology. It remains a pivotal focus in endangered species conservation and biodiversity management. Ornithologists have long recognized the significance of dietary studies; for waterbirds-key indicator taxa in wetland ecosystems-dietary data elucidate species-environment energy/material linkages and critically inform ex situ conservation strategies and captive breeding optimization, particularly for threatened species. Methodologically, waterbird dietary research employs diverse approaches. Traditional techniques (direct observation, gizzard/crop content analysis, fecal microscopy) historically dominated the field. Technological advances now highlight DNA metabarcoding for its high taxonomic resolution, though constrained by sample DNA degradation and cost-intensive procedures. Conversely, stable isotope analysis demonstrates broader utility: beyond resolving dietary composition, it enables migration tracking, quantification of seasonal dietary dynamics, trophic-level mapping, and evidence-based population management and wetland restoration. Amid accelerating climate change and pervasive habitat loss/fragmentation, the scope of waterbird dietary research now transcends conventional boundaries. Objectives have expanded from basic diet characterization to multidimensional investigations of spatiotemporal foraging patterns, habitat restoration efficacy, and migratory ecology. Methodologically, interdisciplinary integration (ecology, genetics, physiology, molecular biology) drives advances in: climate-driven dietary adaptation mechanisms, gut microbiota-diet interactions, paleo-dietary evolution from fossil evidence, migration-resource phenology alignment, precision wetland rehabilitation. High-throughput, information-rich analytical tools (e.g., DNA metabarcoding, stable isotopes) provide unprecedented resolution for quantifying dietary seasonality, migration-stage shifts, and species-distribution-environment relationships. With persistent technological advancements and scientific inquiry, waterbird dietary ecology will increasingly underpin biodiversity conservation, ecosystem governance, and global change mitigation.

Keywords: waterbirds; diet composition; feeding habits research; stable isotopes