



大丰沿海湿地越冬雁鸭类的种子传播网络研究

邵威¹, 刘守国¹, 李宁², 刘彬³, 王征^{1*}

- (1. 南京林业大学生命科学学院, 南京, 210037;
2. 南京晓庄学院应用生态研究所, 南京, 211171;
3. 江苏大丰麋鹿国家级自然保护区管理处, 盐城, 224136)

稿件运行过程

收稿日期: 2024-01-08

修回日期: 2024-02-07



关键词: 雁鸭类;
植物种子;
沿海湿地;
种子传播网络;
网络结构

Keywords: Anatidae;
Plant seeds;
Coastal wetland;
Seed dispersal network;
Network structure

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-01-0118-09

DOI: 10.12375/ysdwxb.20250113

摘要

雁鸭类是分布广泛、数量众多的杂食性鸟类,它们取食湿地植物种子,对湿地植物的更新和定殖尤为重要。2022年11月—2023年5月,在大丰沿海湿地4种不同生境中收集雁鸭类多样性数据,通过雁鸭类粪便中植物种子的鉴定构建种子传播网络,研究雁鸭类对植物种子的传播作用。结果显示:调查期间在大丰沿海湿地共记录雁鸭类11种;种子传播网络由4种雁鸭类及9种植物组成,呈无嵌套且模块化较低的特征;在传播网络中,斑嘴鸭(*Anas zonorhyncha*)传播的植物种类与数量最多;扁秆荆三棱(*Bolboschoenus planiculmis*)被传播的种子数量最多。研究表明,大丰沿海湿地雁鸭类种子传播网络的结构较为简单,斑嘴鸭对传播网络的贡献最大。研究结果揭示了雁鸭类的种子传播作用,进而对滨海湿地的生物多样性保护具有一定科学意义。

Study on the Seed Dispersal Network of Wintering Anatidae in the Coastal Wetland of Dafeng, Jiangsu

TAI Wei¹, LIU Shouguo¹, LI Ning², LIU Bin³, WANG Zheng^{1*}

(1. College of Life Sciences, Nanjing Forestry University,
Nanjing, 210037, China;

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金面上项目(BK20221180)

第一作者简介: 邵威(1998—),男,硕士研究生;主要从事动植物相互关系生态学研究。E-mail: 1696278644@qq.com

*通信作者: 王征, E-mail: zhengw1028@163.com

2. Institute of Applied Ecology, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing, 211171, China;

3. Management Office of Jiangsu Dafeng Pere David's National Nature Reserve, Yancheng, 224136, China)

Abstract: Anatidae is a flock of omnivorous birds with extensive distribution and great amount. They usually feed on the seeds of wetland plants, which plays a crucial role in the regeneration and colonization of wetland plants. To delve deeper into the role of Anatidae in seed dispersal, we embarked on a comprehensive study in the coastal wetland of Dafeng. From November 2022 to May of the subsequent year, we systematically gathered data on the diversity of Anatidae across four distinct habitats in the coastal wetland. Additionally, we collected their fecal samples and meticulously identified the plant species present. This allowed us to establish a comprehensive seed dispersal network of Anatidae. Our survey recorded a total of 11 species of Anatidae in the coastal wetland of Dafeng. The seed dispersal network was composed of four species of Anatidae and nine species of plants, with remarkable non-nested and low-modular characteristics. Within the network, *Anas zonorhyncha* emerged as a key player, facilitating the dispersal of the highest number of plant species and individuals. Among the plants, *Bolboschoenus planiculmis* proved to be the most frequently dispersed species. The results indicate that the structure of the seed dispersal network of Anatidae in the coastal wetland of Dafeng is relatively simple, and *Anas zonorhyncha* contributes the most to the dispersal network. The results reveal the seed dispersal of Anatidae, which has certain scientific significance for the biodiversity conservation in coastal wetlands.

鸟类是生态系统中的重要组成部分,在植物种子传播的过程中充当着重要角色^[1]。对于湿地植物而言,水鸟的种子传播对于植物更新和定殖尤为重要^[2-3]。依据传播方式的不同,湿地水鸟对种子传播分为体外传播和体内传播。水鸟不仅可以通过粪便在水生和陆地生态系统内部或之间传播种子,也可以让种子附着在其羽毛中进行长距离传播^[4]。海岸带湿地植物的主要传播鸟类有大型食草性鸟类(雁类和鹤类)、中型杂食性鸟类(潜鸭类和鸥类)以及小型食无脊椎动物的鸟类(鸬鹚类)等。其中,雁鸭类被认为是湿地植物种子的主要传播类群,它们依赖湿地生存,取食湿地植物种子,数量众多,流动性强,通常在繁殖区和越冬区之间进行长途迁徙^[5]。雁鸭类与湿地植物间的互相作用也形成了复杂的种子传播网络。

现有鸟类互作网络研究主要是利用R语言中的bipartite函数绘制带有节点和边际的图形来表示鸟类与植物间的关系^[6]。同时,也可以从网络水平根据嵌套度(nestedness metric based on overlap and decreasing fill, N_{Dof})、连接度(connectance, C)、模块性(modularity, Q)、专化程度(specialization, H_2')和物种度(species degree, S_D)等结构特征对鸟类-植物网络的拓扑结构进行定量分析^[7-13]。鸟类-植物之间的

互作网络通常表现为一种植物与鸟类的连接包含在一组更大的连接集合中,显示出明显的嵌套结构^[14]。当物种处于由高度联系的物种组成的半独立群体时,这种网络或许也是模块性的^[15-16]。互作网络的结构对群落稳定及其从干扰中恢复的能力具有重要影响^[14,17]。因此,了解鸟类-植物互作网络的结构非常重要。目前对食果鸟类的种子传播网络研究相对较多^[18]。相比之下,涉及雁鸭类等湿地水鸟的种子传播研究在所有生物群落中仍然很少^[19-20]。近年研究表明,雁鸭类种子传播网络显示出嵌套结构,其方式与食果鸟类的传播网络相似,但模块性有高有低,如Sebastián-González *et al.*^[21]研究的古北界水鸟种子传播网络显示出低模块性,而Silva *et al.*^[22]研究的新热带地区的水鸟种子传播网络是呈模块性的,这可能与每个网络内在因素的差异或者研究方法之间的差异相关。

大丰沿海湿地是一个典型的海岸湿地生态系统,水鸟种类丰富,植被类型繁多,是进行雁鸭类种子传播网络研究的理想地。本研究选取大丰麋鹿国家级自然保护区的北部区域为研究地,调查4种不同生境类型中的雁鸭类多样性,收集雁鸭类粪便排放数据;鉴定粪便中植物种子种类并构建雁鸭类种子传播网络。以期回答以下2个问题:(1)大丰沿海

湿地雁鸭类及其传播植物物种如何组成?(2)雁鸭类种子传播网络具有什么样的特点? 研究结果拟探讨雁鸭类与滨海湿地植物之间的互作关系,为揭示雁鸭类对湿地植物的种子传播作用及其在湿地生态系统功能和多样性维持中的作用机制,进而为滨海湿地生态系统的保护和恢复提供案例支撑。

1 研究区概况

江苏大丰麋鹿国家级自然保护区位于江苏省盐城市大丰区(32°59′—33°3′ N, 120°47′—120°53′ E),是典型沿海滩涂湿地类型的保护区。保护区地处亚热带向暖温带的过渡地带,气候特点是海洋和季风的过渡类型。冬季受大陆季风影响,干旱少雨,低温霜冻;夏季受海洋季风影响,高温,降雨丰富。常年平均气温 14.1 °C,年降水量 1 068 mm,降雨多集中在 6—9 月^[23]。研究区位于保护区北部,其中分布有河流、滩涂和池塘等多类型湿地,为雁鸭类提供了适宜的栖息环境。

2 研究方法

于 2022 年 11 月—2023 年 5 月,采用样点法调查雁鸭类多样性,分别在滩涂、河道、鱼塘和农田 4 种生境各设置 4 个样点,共 16 个样点。每个样点观察范围是半径为 500 m 的圆形区域,只记录飞入样圆的雁鸭种类和数量,飞出的雁鸭类不记录。根据潮汐情况,选择合适的时间进行调查,一般调查时间段为 08:00—11:00 和 14:00—17:00。使用 Kowa 双筒望远镜(BD 10 × 42 XD)和 SWAROVSKI 单筒望远镜(ATS 80HD)观察并用佳能相机拍照,数据记录包括每个样点的经纬度、生境类型、雁鸭类的种类和数量等信息。当雁鸭类数量较低时,直接记录雁鸭类种类、数量等;当数量较高无法确切计算时,以拍照来估计雁鸭类集群数量。每天调查 2 种生境,共 8 个样点,2 d 为一个调查周期,每个周期重复 9 次,累积调查时间 108 h。

在每种雁鸭类集群处定点驻守观测,在其停歇地设置多个 1 m × 1 m 的样方,收集样方内新鲜粪便,并辅以粪便的外形、长度和颜色等特征进行区分,分装在密封袋内保存,并标记样方编号、鸟种名称及粪便数量^[24]。粪便收集后,先用自来水通过 0.062 mm (250 目)的筛子冲洗每个粪便样本以获得植物种子,然后将种子归类并采用直接计数统计种

子数量^[25]。采用改良 2 × CTAB 法提取植物种子总 DNA,使用叶绿体基因片段,通过 NCBI 数据库进行 BLAST 碱基比对,进行物种鉴定。

3 数据分析

雁鸭类的种类鉴定主要依据《中国鸟类分类与分布名录》(第 4 版)^[26],居留型划分按照《江苏鸟类》^[27]。当某种雁鸭的个体数量占雁鸭类总数的比例 $P \geq 10.0\%$ 时,该种雁鸭为优势种;当 $1.0\% \leq P < 10.0\%$ 时,该种雁鸭为常见种;当 $0.1\% \leq P < 1.0\%$ 时,该种雁鸭为稀有种;当 $P < 0.1\%$ 时,该种雁鸭为罕见种^[28]。

在雁鸭类群落结构特征分析中,采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数来评价不同雁鸭群落的多样性^[29]。

基于雁鸭类各物种与植物种子之间的取食关系,构建种子传播网络,在 R 4.1.0 软件中利用 plotweb 函数绘制雁鸭类种子传播网络。在网络水平上,采用连接度、嵌套度、模块性和专化程度 4 种网络结构参数评估雁鸭类在网络结构中的作用。在物种水平上,采用物种度(species degree, S_D)、物种强度(species strength, S_S)、连接多样性(partner diversity, P_D)和专化指数(specificity index, S_I) 4 种参数评估。网络水平和物种水平参数均在 R 4.1.0 软件中使用 Bipartite 包中 species level 函数运算。

4 结果

4.1 不同生境雁鸭类群落多样性

2022 年 11 月—2023 年 5 月共记录雁鸭类 11 种 5 666 只。斑嘴鸭(*Anas zonorhyncha*)和绿头鸭(*A. platyrhynchos*)为优势种,普通秋沙鸭(*Mergus merganser*)为罕见种,另有赤膀鸭(*Mareca strepera*)、罗纹鸭(*M. falcata*)和绿翅鸭(*Anas crecca*) 3 种为常见种,豆雁(*Anser fabalis*)、赤颈鸭(*Mareca penelope*)、琵嘴鸭(*Spatula clypeata*)、翘鼻麻鸭(*Tadorna tadorna*)和针尾鸭(*Anas acuta*) 5 种为稀有种。调查到近危(NT)物种 1 种,即罗纹鸭。从居留型上看,11 种雁鸭类均为冬候鸟。雁鸭类总体 Shannon-Wiener 多样性指数为 1.144, Pielou 均匀度指数为 0.477, Simpson 优势度指数为 0.401。

从不同月份雁鸭类的种类和数量变化来看,其种类和数量从 2022 年 11 月(8 种 1 894 只)起呈短暂

的递增趋势,至2022年12月均达到峰值,为9种2 632只,之后逐月递减,到2023年5月仅记录到1种7只斑嘴鸭。

从不同生境间雁鸭类的种类和数量来看,滩涂生境的雁鸭类种类和数量最高,河道生境次之,农田

生境仅记录到5只斑嘴鸭,鱼塘生境未发现雁鸭类。从多样性指数来看,滩涂生境 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均高于河道生境,而河道生境 Simpson 优势度指数高于滩涂生境(表1)。

表1 大丰沿海湿地滩涂和河道生境雁鸭类多样性

Table 1 Diversity of Anatidae in shoal and river habitat in the coastal wetland of Dafeng

生境类型 Habitat type	物种数量/种 Number of species	个体数量/只 Number of individuals	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Pielou index	优势度指数 Simpson index
滩涂 Tidal flat	10	5 148	0.934	0.406	0.470
河道 River channel	2	513	0.212	0.306	0.897
农田 Farmland	1	5			
鱼塘 Fish pond					

4.2 雁鸭类粪便中植物种子组成

在调查的11种雁鸭类中,有4种雁鸭参与了湿地植物种子传播(图1)。在滩涂生境采集到斑嘴鸭、赤膀鸭、绿头鸭和绿翅鸭的粪便共1 551粒,其中斑嘴鸭的粪便数量最多,占粪便总数的59.19%;绿翅

鸭的粪便数量最少,占粪便总数的2.77%。在6.77%的鸭类粪便中至少含有1颗植物种子,其中1.16%的鸭类粪便中含有完整种子,5.61%的鸭类粪便中含有破碎种子。



A. 斑嘴鸭;B. 赤膀鸭;C. 绿翅鸭;D. 绿头鸭。

A. *Anas zonorhyncha*;B. *Mareca strepera*;C. *Anas crecca*;D. *Anas platyrhynchos*.

图1 参与湿地植物种子传播的雁鸭类粪便

Figure 1 The feces of Anatidae involved in seed dispersal of wetland plants

在鸭类粪便中分离出植物种子共 121 颗,其中 14.88% 的种子完整,85.12% 的种子破碎。斑嘴鸭粪便中分离出的种子数量最多,占种子总数的 85.95%,绿翅鸭粪便中分离出的种子数量最少,占

种子总数的 0.83%。斑嘴鸭粪便中分离出 95.19% 的植物种子均是破碎种子,绿头鸭和绿翅鸭的粪便中分离出的种子均是完整的(表 2)。

表 2 大丰沿海湿地参与湿地植物种子传播的雁鸭类粪便中植物种子的数量

Table 2 Quantity of plant seeds in the feces of Anatidae involved in the plant seeds dispersal in the coastal wetland of Dafeng

雁鸭种类 Anatidae	粪便数量 Number of feces			种子数量/颗 Number of seeds		
	总数 Total	含完整种子 Number of feces with intact seeds	含破碎种子 Number of feces with broken seeds	完整种子 Intact seed	破碎种子 Broken seed	合计 Total
斑嘴鸭 <i>Anas zonorhyncha</i>	918	5	83	5	99	104
赤膀鸭 <i>Mareca strepera</i>	302	5	4	5	4	9
绿头鸭 <i>Anas platyrhynchos</i>	288	7	0	7	0	7
绿翅鸭 <i>Anas crecca</i>	43	1	0	1	0	1

通过种子叶绿体基因鉴定表明,在雁鸭类粪便中的植物种子共有 9 种 112 颗,其中 5 种鉴定到种水平,包括扁秆荆三棱(*Bolboschoenus planiculmis*)、齿果酸模(*Rumex dentatus*)、葎草(*Humulus scandens*)、乌柏(*Triadica sebifera*)和水稻(*Oryza sativa*);4 种鉴

定到属水平,包括莎草属(*Cyperus*)种子 3 种和杨属(*Populus*)种子 1 种(图 2)。从种子数量上看,扁秆荆三棱种子占比最高,为 82.64%,其次是水稻种子(3.31%),乌柏种子和莎草属种子占比均为 1.65%,其他 3 种种子的占比较少,均为 0.83%。



A. 扁秆荆三棱;B. 齿果酸模;C. 葎草;D. 乌柏;E. 杨属;F. 莎草属种 1;G. 莎草属种 2;H. 莎草属种 3;I. 水稻。

A. *Bolboschoenus planiculmis*;B. *Rumex dentatus*;C. *Humulus scandens*;D. *Triadica sebifera*;E. *Populus*;F. *Cyperus* 1;G. *Cyperus* 2;H. *Cyperus* 3;I. *Oryza sativa*.

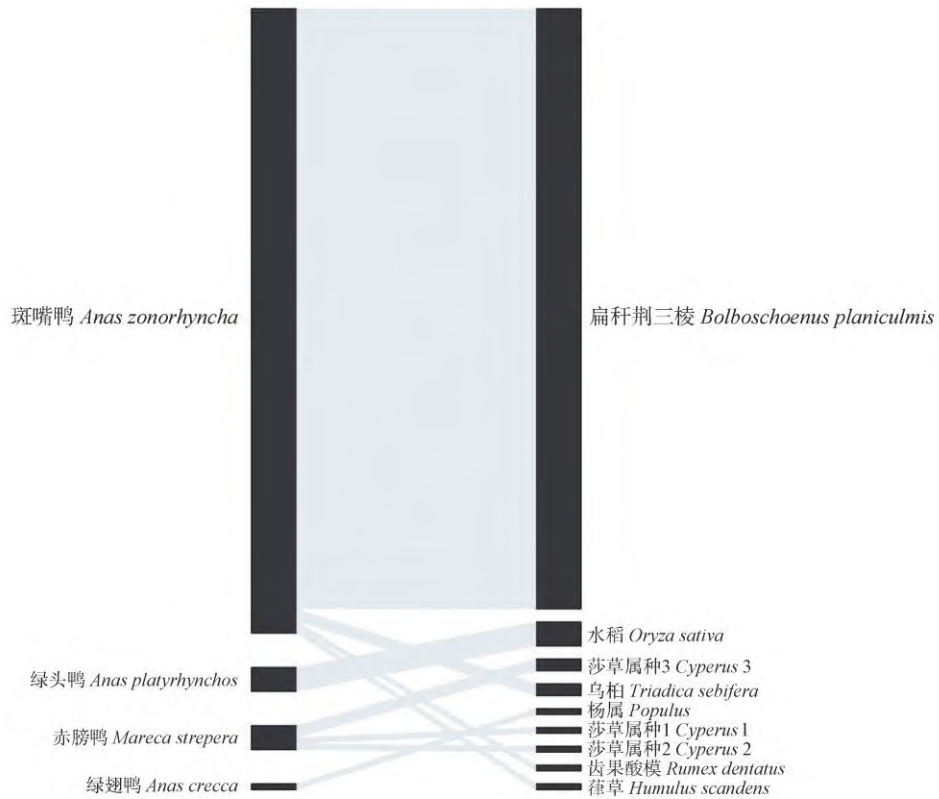
图 2 雁鸭类粪便中鉴定出的 9 种植物种子

Figure 2 Nine species of plant seeds identified from the feces of Anatidae

4.3 雁鸭类种子传播网络

2022年11月—2023年5月的鸭类与植物种子传播网络由9种植物和4种鸭类构成(图3)。网络结构分析(图3)显示,网络连接度为0.25,专化程度为1,嵌套度为0,模块性为0.152。鸭类物种度为1~4,其中斑嘴鸭最高,与4种植物连接;物种强度为1~4,斑嘴鸭最高,绿头鸭和绿翅鸭最低;连接多样

性为0~1.040,其中赤膀鸭最高,而绿头鸭和绿翅鸭只记录到传播1种植物种子,连接多样性为0;专化指数均为1(表3)。植物物种度均为1,每一种植物种子只被一种鸭类传播;物种强度为0.010~1.000,其中水稻和杨属最高,齿果酸模和葎草最低;专化指数为0~1.000,其中水稻和杨属最高,齿果酸模、葎草和乌桕最低(表4)。



左边节点代表雁鸭类,右边节点代表植物,连接线粗细代表种子传播数量。

The nodes on the left represent Anatidae, the nodes on the right represent plants, and the thickness of the connecting line represents seed dispersal number.

图3 大丰沿海湿地雁鸭类的种子传播网络

Figure 3 Seed dispersal network of Anatidae in the coastal wetland of Dafeng

表3 鸟类物种水平网络参数

Table 3 Species-level network indexes of birds

雁鸭种类 Anatidae	物种度 Species degree	物种强度 Species strength	连接多样性 Partner diversity	专化指数 Specificity index
斑嘴鸭 <i>Anas zonorhyncha</i>	4	4	0.205	1
赤膀鸭 <i>Mareca strepera</i>	3	3	1.040	1
绿头鸭 <i>Anas platyrhynchos</i>	1	1	0	1
绿翅鸭 <i>Anas crecca</i>	1	1	0	1

表4 植物物种水平网络参数
Table 4 Parameters of species-level network of plants

植物种类 Plant species	物种度 Species degree	物种强度 Species strength	连接多样性 Partner diversity	专化指数 Specificity index
扁秆荆三棱 <i>Bolboschoenus planiculmis</i>	1	0.961	0	0.677
齿果酸模 <i>Rumex dentatus</i>	1	0.010	0	0
葎草 <i>Humulus scandens</i>	1	0.010	0	0
乌柏 <i>Triadica sebifera</i>	1	0.019	0	0
莎草属种1 <i>Cyperus 1</i>	1	0.250	0	0.701
莎草属种2 <i>Cyperus 2</i>	1	0.250	0	0.701
莎草属种3 <i>Cyperus 3</i>	1	0.500	0	0.824
水稻 <i>Oryza sativa</i>	1	1.000	0	1.000
杨属 <i>Populus</i>	1	1.000	0	1.000

5 讨论与结论

大丰沿海湿地滩涂辽阔、河荡众多,为水鸟的栖息生存提供了得天独厚的自然条件。该区域地处候鸟迁徙通道的重要地段,是候鸟迁徙的重要停歇地、也是部分候鸟的越冬地,其中雁鸭类种类丰富且数量较多^[30]。本研究首次以大丰沿海湿地为研究地,调查了雁鸭类与植物之间的互作关系,其结果有利于滨海湿地的科学保护。

本研究共记录雁鸭类11种,大多分布于滩涂生境,其中有4种雁鸭传播9种植物种子。与已有的雁鸭类等水鸟传播网络研究相比,大丰沿海湿地雁鸭类种子传播网络的结构简单,雁鸭类种类和植物种类较少,显示出无嵌套($N_{\text{ODF}} = 0$)且模块性($Q = 0.152$)较低的特征。Sebastián-González *et al.*^[21]通过对古北界雁鸭类等水鸟和被子植物互作网络的研究发现,其与食果鸟类种子传播网络之间存在重要差异,种子传播网络的结构与鸟类特征和植物特征有关,如鸟类体型和果实营养成分等,并未发现物种特征对雁鸭类等水鸟网络有显著影响。相比之下,大丰沿海湿地雁鸭类种子传播网络结构简单,网络中物种量较少,网络无嵌套。这或许是由于一些雁

鸭类更喜欢取食植物根茎或水生无脊椎动物等^[31];其次由于雁鸭类喙中的细薄片结构,使得不少体积小的种子在取食时被过滤掉^[32]。因此本研究中雁鸭类种类和雁鸭类粪便中的种子十分有限,每种植物种子也只存在于一种雁鸭类粪便中。无嵌套性说明种子传播网络稳定性差,应对环境变化的抵抗力低^[33]。在大丰沿海湿地中,每种植物只与一种雁鸭类连接,若一些雁鸭类消失,可能会影响该植物种子的传播。低模块性可能由于本研究网络中只包含一类具有相同分类地位的鸟种即雁鸭类,当种子传播者具有较大的形态或生态差异时,种子传播网络中的模块性才更为常见^[34]。低模块性也可能由于大丰沿海湿地种子传播的生境为连续的滩涂,与内陆湿地相比,滩涂破碎化程度较低,受环境压力较小,雁鸭类和植物间紧密互作较少。

斑嘴鸭在本区域数量最多,分布范围最广,采集到的粪便量及完整种子数量都高于其他雁鸭类,故推测斑嘴鸭对于湿地植物种子传播的贡献最大。常见雁鸭类除了可以帮助植物种子进行长距离传播之外还有着一些潜在贡献,如雁鸭类取食植物种子后,植物种子经肠道作用可打破种子的休眠限制,提高种子萌发率;同时,以粪便排出的种子具有足够的有

机质作肥料而更容易萌发^[32]。此外,在被传播的植物中扁秆荆三棱种子数量最多,均被斑嘴鸭所传播。扁秆荆三棱是一种常见的水生植物,多生于水田、河滩和沼泽地等处^[35],繁殖方式多样,包括种子繁殖、根茎分生和碎片生殖等,使其能够在短时间内快速扩张,占据水域资源^[36],因此易于被斑嘴鸭轻松取食。扁秆荆三棱结实量较大能够产生广告效应,吸引斑嘴鸭取食。

本研究首次揭示了大丰沿海湿地雁鸭类种子传播网络的结构特征,以及常见雁鸭类在滨海湿地中的生态作用,为评估滨海湿地植物群落的稳定性和多样性,推动生态保护政策的制定和实施提供科学依据。鸟类-植物相互作用是生态系统中较为复杂的过程,想要系统了解海岸带雁鸭类鸟类种子传播网络应开展长期持续研究,延长年度调查时间,并扩大研究水鸟类群,不断充实互作网络的物种组成。此外,本研究并未涉及植物种类多样性对种子传播网络结构的影响分析,在后续试验中应加以研究,以期更好地揭示湿地生态系统中水鸟与湿地植物之间的互作关系。

参考文献:

- [1] HOWE H F, SMALLWOOD J. Ecology of seed dispersal[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1982, 13(1): 201-228.
- [2] DE VLAMING V, PROCTOR V W. Dispersal of aquatic organisms: viability of seeds recovered from the droppings of captive killdeer and mallard ducks [J]. American Journal of Botany, 1968, 55(1): 20-26.
- [3] POLLUX B J A, SANTAMARIA L, OUBORG N J. Differences in endozoochorous dispersal between aquatic plant species, with reference to plant population persistence in rivers[J]. Freshwater Biology, 2005, 50(2): 232-242.
- [4] FIGUEROLA J, GREEN A J. Dispersal of aquatic organisms by waterbirds: a review of past research and priorities for future studies[J]. Freshwater Biology, 2002, 47(3): 483-494.
- [5] CHARALAMBIDOU I, SANTAMARÍA L. Waterbirds as endozoochorous dispersers of aquatic organisms: a review of experimental evidence[J]. Acta Oecologica, 2002, 23(3): 165-176.
- [6] DELMAS E, BESSON M, BRICE M H, *et al.* Analysing ecological networks of species interactions [J]. Biological Reviews, 2019, 94(1): 16-36.
- [7] ALMEIDA-NETO M, GUIMARÃES P, GUIMARÃES P R, Jr, *et al.* A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement [J]. Oikos, 2008, 117(8): 1227-1239.
- [8] DUNNE J A, WILLIAMS R J, MARTINEZ N D. Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance[J]. Ecology Letters, 2002, 5(4): 558-567.
- [9] OLESEN J M, BASCOMPTE J, DUPONT Y L, *et al.* The modularity of pollination networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19891-19896.
- [10] BLÜTHGEN N, MENZEL F, HOVESTADT T, *et al.* Specialization, constraints, and conflicting interests in mutualistic networks[J]. Current Biology, 2007, 17(4): 341-346.
- [11] BLÜTHGEN N, MENZEL F, BLÜTHGEN N. Measuring specialization in species interaction networks [J]. BMC Ecology, 2006, 6(1): 9.
- [12] DÁTTILO W, LARA-RODRÍGUEZ N, JORDANO P, *et al.* Unravelling Darwin's entangled bank: architecture and robustness of mutualistic networks with multiple interaction types[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2016, 283(1843): 20161564.
- [13] HERNÁNDEZ-DÁVILA O A, LABORDE J, SOSA V J, *et al.* Interaction network between frugivorous birds and zoochorous plants in cloud forest riparian strips immersed in anthropic landscapes[J]. Avian Research, 2022, 13: 100046.
- [14] BASCOMPTE J, JORDANO P. The structure of plant-animal mutualistic networks[M]//PASCUAL M, DUNNE J. Ecological networks. Oxford: Oxford University Press, 2006: 143-159.
- [15] GUIMARÃES P R, Jr, PIRES M M, JORDANO P, *et al.* Indirect effects drive coevolution in mutualistic networks [J]. Nature, 2017, 550(7677): 511-514.
- [16] SEBASTIÁN-GONZÁLEZ E. Drivers of species' role in avian seed-dispersal mutualistic networks[J]. Journal of Animal Ecology, 2017, 86(4): 878-887.
- [17] ROHR R P, SAAVEDRA S, BASCOMPTE J. On the structural stability of mutualistic systems[J]. Science, 2014, 345(6195): 1253497.
- [18] EMER C, JORDANO P, PIZO M A, *et al.* Seed dispersal networks in tropical forest fragments: area effects, remnant species, and interaction diversity [J]. Biotropica, 2020, 52(1): 81-89.
- [19] GREEN A J, SOONS M, BROCHET A L, *et al.* Dispersal of plants by waterbirds[M]//ŞEKERCIOĞLU C H, WENNY D G, WHELAN C J. Why birds matter: avian ecological function and ecosystem services. Chicago: University of Chicago Press, 2016: 147-195.
- [20] GREEN A J, BALTZINGER C, LOVAS-KISS Á. Plant dispersal syndromes are unreliable, especially for predicting zoochory and long-distance dispersal [J]. Oikos, 2022, 2022(2): e08327.
- [21] SEBASTIÁN-GONZÁLEZ E, LOVAS-KISS Á, SOONS M B, *et al.* Waterbird seed-dispersal networks are similarly nested but less modular than those of frugivorous birds, and not driven by functional traits[J]. Functional Ecology, 2020, 34(11): 2283-2291.

- [22] SILVA G G, PIZO M A, GREEN A J, *et al.* A waterfowl seed-dispersal network from the Neotropical region is nested and modular[J]. *Biotropica*, 2023, 55(2): 480–488.
- [23] 刘彬, 孙大明, 王立波, 等. 狼尾草和白茅生境鸟类群落研究[J]. *野生动物学报*, 2018, 39(3): 693–698.
LIU B, SUN D M, WANG L B, *et al.* Bird community structure of Chinese pennisetum (*Pennisetum alopecuroides*) habitat and cogon grass (*Imperata cylindrica*) habitat[J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2018, 39(3): 693–698.
- [24] SILVA G G, GREEN A J, HOFFMAN P, *et al.* Seed dispersal by neotropical waterfowl depends on bird species and seasonality [J]. *Freshwater Biology*, 2021, 66(1): 78–88.
- [25] WONGSRIPHUEK C, DUGGER B D, BARTUSZEVICE A M. Dispersal of wetland plant seeds by mallards: influence of gut passage on recovery, retention, and germination[J]. *Wetlands*, 2008, 28(2): 290–299.
- [26] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2023.
ZHENG G M. A checklist on the classification and distribution of the birds of China[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2023.
- [27] 鲁长虎. 江苏鸟类[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
LU C H. Birds of Jiangsu[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015.
- [28] 王玄, 崔鹏, 丁晶晶, 等. 江苏南部沿海越冬水鸟群落结构及多样性分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(5): 178–184.
WANG X, CUI P, DING J J, *et al.* Community structure and diversity of overwintering waterfowls in south coast of Jiangsu Province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 45(5): 178–184.
- [29] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: I. α 多样性的测度方法: 下[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4): 231–239.
MA K P, LIU Y M. Measurement methods of biome diversity: I. α diversity measurement methods: 2nd chapter[J]. *Chinese Biodiversity*, 1994, 2(4): 231–239.
- [30] 刘彬, 丁玉华, 任义军. 大丰麋鹿保护区冬季鸟类群落特征[J]. *野生动物*, 2010, 31(4): 192–196.
LIU B, DING Y H, REN Y J. Avian community in winter in Dafeng Milu National Nature Reserve [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2010, 31(4): 192–196.
- [31] NAVARRO-RAMOS M J, GREEN A J, LOVAS-KISS A, *et al.* A predatory waterbird as a vector of plant seeds and aquatic invertebrates[J]. *Freshwater Biology*, 2022, 67(4): 657–671.
- [32] SOONS M B, BROCHET A L, KLEYHEEG E, *et al.* Seed dispersal by dabbling ducks: an overlooked dispersal pathway for a broad spectrum of plant species [J]. *Journal of Ecology*, 2016, 104(2): 443–455.
- [33] BASCOMPTE J, JORDANO P, MELIÁN C J, *et al.* The nested assembly of plant-animal mutualistic networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(16): 9383–9387.
- [34] DONATTI C I, GUIMARÃES P R, GALETTI M, *et al.* Analysis of a hyper-diverse seed dispersal network: modularity and underlying mechanisms [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14 (8): 773–781.
- [35] 李惠芳, 章光新. 水盐交互作用对莫莫格国家级自然保护区扁秆藨草幼苗生长的影响[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2): 173–177.
LI H F, ZHANG G X. Influence of water depth and salinity coupling on growth of *Scirpus planiculmis* seedlings in Momoge National Nature Reserve [J]. *Wetland Science*, 2013, 11(2): 173–177.
- [36] 殷甘强, 杨梅, 王玉国, 等. 两种藨草属植物对盐度的表型可塑性反应[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2018, 57(1): 43–50.
YIN G Q, YANG M, WANG Y G, *et al.* Phenotypic plastic response of two *Scirpus* species to salinity gradient [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2018, 57(1): 43–50.