

# 社会网络分析方法在鸟类物种多样性分析中的应用

## ——以董寨国家级自然保护区 5.5 d 环志数据为例

朱家贵<sup>①</sup> 黄华<sup>①</sup> 杜志勇<sup>①</sup> 溪波<sup>①</sup> 杨勇<sup>①</sup> 王代平<sup>②\*</sup>

<sup>①</sup> 河南信阳罗山县董寨国家级自然保护区管理局 罗山 464236;

<sup>②</sup> 动物生态与保护生物学院重点实验室, 中国科学院动物研究所 北京 100101

**摘要:** 本研究通过社会网络分析网捕环志的数据, 来调查河南董寨国家级自然保护区的鸟类物种多样性以及鸟类物种的集群特征。在 2021 年 10 月连续 5.5 d 的网捕环志中, 总共环志 12 科 33 种鸟类, 其中环志最多的鸟类物种为棕头鸦雀 (*Sinosuthora webbiana*)、红胁绣眼鸟 (*Zosterops erythropleurus*) 和强脚树莺 (*Horornis fortipes*)。33 个物种中树栖食虫鸟类最多, 共 12 个物种, 其次是地表食虫鸟类 (共 8 个物种) 和杂食鸟类 (共 6 个物种); 留鸟 17 种和迁徙鸟类 16 种。通过社会网络分析, 发现种群数量多的物种处于社会拓扑网络的中心位置, 而且相同食性生态位的物种连结强度很高, 如树栖食虫鸟类。结果表明, 物种种群数量、食性生态位对鸟类物种社会网络关系的影响较大, 而物种迁徙特征对鸟类物种社会网络关系则几乎没有影响。本文在国内尝试了采用社会网络分析来调查当地鸟类物种群落的多样性, 并揭示了鸟类多物种集群的关键驱动因子。对比传统的鸟类群落调查方法, 多物种社会网络分析可获取该集群的时空分布以及物种之间的相互联系。由于社会网络分析可以分析和研究不同生物水平包括个体、种群、物种等的社会行为, 从而使之成为近年来很多生物研究领域的常用和热点工具。

**关键词:** 环志; 董寨; 鸟类物种多样性; 多物种集群; 社会网络分析; 食性生态位; 迁徙特征

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2022) 03-455-07

## Bird Species Diversity Based on Animal Social Network Analysis

### —An Example Using Banding Data from Dongzhai National Reserve

ZHU Jia-Gui<sup>①</sup> HUANG Hua<sup>①</sup> DU Zhi-Yong<sup>①</sup> XI Bo<sup>①</sup> YANG Yong<sup>①</sup> WANG Dai-Ping<sup>②\*</sup>

<sup>①</sup> Dongzhai National Reserve, Luoshan 464236; <sup>②</sup> Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology,

Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract: [Objectives]** Animal social network analysis can provide a flexible toolbox for describing the

\* 通讯作者, E-mail: wangdaiping@ioz.ac.cn;

**第一作者简介** 朱家贵, 男, 高级工程师; 研究方向: 自然保护区管理和野生资源保护; E-mail: zwf7054@163.com。

收稿日期: 2021-12-30, 修回日期: 2022-04-02 DOI: 10.13859/j.cjz.202203015

social system of species or populations in a directly quantitative and comparable manner. However, it requires careful consideration of differentiating real from observed networks and controlling for inherent biases that are common in social data. To investigate the species diversity and its community characteristics at the Dongzhai National Reserve, Henan Province, China. **[Methods]** We carried out 5.5 days of bird banding using mist nets in 2021. Using animal social network analysis, we investigate the social network of species in this reserve. With the network of species implanting species' life-history traits (i.e. trophic niche and migration), we investigate the impact of these life-history traits on the network's structure. Animal social network analysis was done using the R packages 'asnipe' and 'igraph'. **[Results]** 33 species of birds from 12 families were banded among which the most banded species were Vinous-throated Parrotbill (*Sinosuthora webbiana*), Chestnut-flanked White-eye (*Zosterops erythropleurus*) and Brown-flanked Bush Warbler (*Horornis fortipes*) (Table 1). As to the trophic niche of these 33 species, 12 belong to invertivore glean arboreal, 8 to invertivore ground, and 6 to generalist (Table 1, Fig. 1). Seventeen species of the ringed birds are residential and 16 species are migratory. We found that common species appeared in the central of the social network. Moreover, species with the same trophic niche are grouped together in the social network. However, species with the same migration feature (either resident or migratory) appeared randomly in the network (Fig. 1). **[Conclusions]** These patterns indicated that the population size and trophic niche, but not migration, are important factors that influence the social network of species. In short, social network analysis is an advanced method for describing the structure of multi-species groups and investigating the mechanisms underlying collective behavior.

**Key words:** Bird ringing; Dongzhai; Bird diversity; Mixed species social group; Social network analysis; Trophic niche; Migration

动物中鸟类物种集群在野外比较常见。这种具有社会性的物种集群 (mixed species social group) 与几个物种随机出现在一起具有明显的区别。主要因为多物种社会集群是不同物种之间互动吸引或者相互避开而形成的非随机组合 (Whitehead 2008)。例如, 由于当地有限的资源导致不同物种集群活动 (如集群觅食); 热带雨林内常见的“鸟浪”现象。

从生态学角度出发, 通过调查某个地区的鸟类群落以及物种组成, 不仅仅可以获得该地区鸟类物种多样性的第一手资料; 加上长时间的数据积累, 可掌握鸟类群落多样性的季节和年际变化; 结合气象资料, 可研究气候变化对鸟类群落多样性带来的影响。从进化学角度来讲, 已有的研究认为多个物种聚集在一起可以带来诸多利益。例如多物种集群通过相互交流其共同天敌的警卫信息, 从而可以增加天敌防

卫; 集群物种之间对食物的信息交流也能提高集群中个体的觅食效率 (Kokko et al. 2001, Clutton-Brock 2009)。以上这些假说可以通过社会网络分析检验该集群的群体特征和物种组成; 辅之以物种的社会角色、食性生态位以及生境特征等加以验证。

社会网络分析 (social network analysis, SNA) 是生物学家用来研究动物群落多物种等复杂社会常用的工具, 包括研究动物集群的原因机制以及功能意义 (Farine et al. 2015)。社会网络分析的优点在于通过考虑动物集群组成单元 (物种或者个体) 所处的不同社会环境, 帮助研究者理解当地生境如何驱动动物集群的机制 (Strandburg-Peshkin et al. 2013); 物种 (个体) 行为差异如何影响集群结构 (Boogert et al. 2008, Aplin et al. 2013, Jacoby et al. 2014, Snijders et al. 2014); 信息流或者疾病在集群

中的传播方式等 (Boogert et al. 2008, Hamede et al. 2009, Kendal et al. 2010)。传统的鸟类群落调查 (如样线调查法) 仅仅查明当地鸟类群落及物种组成, 而群落物种的时空分布以及物种之间的相互联系 (例如集群行为) 等这些重要的信息均无法获取。因此迫切需要新的分析方法来进一步深入探究当地鸟类群落物种多样性及其动态。由于社会网络分析可以分析和研究不同生物水平包括个体、种群、物种等的社会行为, 从而使之成为近年来很多生物研究领域的常用和热点工具。

对于由多个物种组成的鸟类集群, 通过社会网络分析不仅可以直接描述该地区的鸟类物种多样性, 同时也可以研究该集群中不同物种的相互关系以及不同物种在该集群中的社会角色 (Farine et al. 2012)。进一步通过调查该鸟类集群中组成物种的重要生活史或行为特征 (如食性、迁徙特征等), 可以深入揭示鸟类集群的背后驱动因子, 从而对该鸟类集群的进化机制和功能加以丰富的描述和研究。

尽管国外运用社会网络分析 (SNA) 研究动物集群 (多物种集群或同一物种多个个体集群) 比较流行 (Whitehead 2008, Farine et al. 2012, Farine et al. 2015), 在国内类似研究至今还鲜有报道。在本研究中, 我们拟运用社会网络分析来描述当地鸟类物种多样性, 并且分析探究每个物种在社会集群中的位置和角色。我们首先在河南董寨保护区通过网捕环志调查该地区的鸟类群落物种组成及多样性。其次, 对环志到的鸟类物种集群 (群落) 进行社会网络分析, 探究集群中不同物种的相互关系以及不同物种在该集群中的社会角色。第三, 将该集群中物种在社会网络关系图的位置与角色与物种的两个重要生活史特征食性生态位和迁徙特征相关联, 试图揭示该地区鸟类集群的驱动因子, 从而探究鸟类集群的进化机制和功能。在本研究中, 选取物种的食性生态位和迁徙特征这两个重要生活史特征结合到社会网络分析当中, 主要因为之前研究认为这两个生活史特征是驱动

动物尤其是鸟类集群的重要因子 (Kokko et al. 2001, Clutton-Brock 2009)。

## 1 方法

### 1.1 研究地点

研究地点位于董寨国家级自然保护区荒田保护站。董寨位于河南省信阳大别山脉北坡西段罗山县境内 (114°18' ~ 114°30' E, 31°28' ~ 32°09' N), 海拔跨度为 70 ~ 840 m。由于其独特地理位置 (秦岭-淮河; 以及北亚热带向北暖温带的过渡区), 董寨气候过渡性特征非常明显, 全年四季分明, 温暖湿润, 年均降水量为 1 209 mm, 年均气温为 15 °C。保护区森林生态系统保存完好, 为野生动物尤其是鸟类提供了良好的栖息环境 (王代平等 2013)。

### 1.2 网捕环志

在 2021 年 10 月 10 日至 15 日, 在保护站周围选取森林边缘、林间小溪水边等鸟类活跃的生境作为环志网点。主要采用高 3 ~ 5 m 的粘网进行网捕, 网捕期间每天日出时把网架开, 日落时关网, 开网时间每隔 0.5 h 巡视一次并将网捕到的鸟类按照标准流程将其取下, 以保证鸟类的安全。网捕到的鸟类马上到就近环志点进行物种鉴定 (刘阳等 2021), 形态测量, 采用全国鸟类环志中心提供的金属环进行标记, 然后放飞。

### 1.3 数据分析

环志为期 5.5 d, 将整个环志期间按每天上、下午将 5.5 d 分为 11 个时间分段 (time-block)。统计每个时间分段环志到的所有物种, 每个物种环志到的个体数 (环志频率)。环志到各物种的食性生态位和迁徙特征主要参考 (Dufour et al. 2020, Pigot et al. 2020)。对于每一个时间分段环志到的物种, 我们将其归为一个物种集群社会单元 (group by species)。每个物种集群社会单元 ( $n = 11$ ) 的物种因为出现在同一时间分段, 因此具有一定的社会关联性 (association)。通过动物社会网络分析可以将多个物种集群社会单元整合到一起构成一张社

会网络关系图，从而呈现包括整个集群以及集群内社会单元之间的社会关联性。进一步结合该社会网络关系中每一个物种 (node) 的重要生活史特征 (如食性生态位和迁徙特征等)，来验证物种集群的重要驱动因子。本研究中社会网络分析在 R 统计语言中运行 (R Development Core Team 2021)，采用社会网络分析程序包 ‘asnipe’ (Farine 2013) 以及社会网络分析结果可视化程序包 ‘igraph’ (Csardi et al. 2006)。

## 2 结果

### 2.1 环志监测情况

本次环志为期 5.5 d 共分为 11 个时间分段。总共环志到 12 科 33 个物种 279 只鸟类。环志频率最高的棕头鸦雀 ( $n = 61$  次)，其次为红胁绣眼鸟 ( $n = 32$  次) 和强脚树莺 ( $n = 21$  次)。从食性生态位角度，环志到的树栖食虫鸟类最多 (invertivore glean arboreal: 共 12 个物种 132 只)，其次是地表食虫鸟类 (invertivore groud: 共 8 个物种 16 只) 和杂食鸟类 (generalist: 共 6 个物种 102 只)。环志到留鸟 17 种 (167 只) 和迁徙物种 16 种 (112 只)。环志监测统计见表 1。

### 2.2 物种集群社会网络分析

对本次环志的 33 个物种进行社会网络分析得到的社会网络拓扑关系图见图 1。结果发现，树栖食虫类，包括大山雀 (*Parus major*)、黄腹山雀 (*Periparus venustulus*)、红胁绣眼鸟 (*Zosterops erythropleurus*)、褐柳莺 (*Phylloscopus fuscatus*)、厚嘴苇莺 (*Arundinax aedon*)、黄眉柳莺 (*P. inornatus*)、极北柳莺 (*P. borealis*)、巨嘴柳莺 (*P. schwarzi*)、强脚树莺 (*Horornis fortipes*)、棕脸鹟莺 (*Abroscopus albogularis*)、红头长尾山雀 (*Aegithalos concinnus*) 及银喉长尾山雀 (*A. caudatus*) 处于社交关系图中心位置，并且这些物种之间具有很强的连结。与此类似，几种杂食鸟类，棕头鸦雀 (*Sinosuthora webbiana*)、领雀嘴鹀 (*Spizixos semitorques*) 和暗绿绣眼鸟 (*Z.*

*japonicus*) 也处于社交关系图中心位置，且相互连结很强。这表明食性生态位影响物种集群的组成，相同食性生态位的物种往往集合在一起。与此相反，相同迁徙特征的物种在该社会网络关系图中的连结度并不是很高 (图 1)。

## 3 讨论

在本研究中，首先我们通过网捕调查，环志到鸟类 33 种，环志频率最高的为棕头鸦雀、红胁绣眼鸟、强脚树莺等 (表 1)。这与前期董寨环志的数据相符 (黄华等 2019)，究其原因主要是这些鸟种是该地区的常见物种，种群数量多且偏爱在灌丛和低矮的乔木上活动。通过社会网络分析，这几个常见物种也处于群落社交关系图的中心位置 (图 1)。结合环志和社会网络分析结果表明，当地优势物种一般也是组成当地鸟类群落以及集群的主要物种。这意味着物种种群数量 (本研究中通过环志频率可以反映出来) 是决定当地鸟类物种社会网络关系的一个重要因子。

将物种食性生态位与社会拓扑网络关系结合分析得出，相同食性生态位的物种连结强度很高 (如图 1 中树栖食虫类)。表明相同食性生态位的物种更容易集群在一起活动，是决定当地鸟类物种社会网络关系的另一个重要因子。具有相同食性生态位的物种在一起活动尤其是集群觅食，可以通过物种之间关于食物信息的共享来提高集群中物种以及个体的觅食效率，甚至可以一起防卫天敌 (Kokko et al. 2001, Clutton-Brock 2009)。本研究结果初步支持以上观点，具体的验证还需要更多的数据和操作实验。

物种迁徙特征也被认为可以决定鸟类物种社会网络关系。例如，迁徙鸟类物种一起过境停靠某个地区从而造成该地多个迁徙物种的集群活动。然而，我们的研究发现，具有相同迁徙特征的物种 (迁徙或留鸟) 在社会网络关系图中并没有明显地聚集在一起 (连接强度不高)。整个 33 个物种的社会网络关系图中 (图 1)，

表 1 本研究环志监测统计表

Table 1 Summary table of the bird ringing in this study

科 Family	物种 Species	环志频次 Band frequency	食性生态位 Trophic niche	迁徙特征 Migration
鹎科 Pycnonotidae	白头鹎 <i>Pycnonotus sinensis</i>	10	食果类 Fugivore glean	留鸟 Resident
	黄臀鹎 <i>P. xanthorrhous</i>	1		
	领雀嘴鹎 <i>Spizixos semitorques</i>	20	杂食类 Generalist	
鹟科 Turdidae	北红尾鹟 <i>Phoenicurus aureoreus</i>	1	表面食虫类 Invertivore sally ground	迁徙 Migratory
	红喉歌鹟 <i>Calliope calliope</i>	2	地表食虫类 Invertivore ground	
	红尾歌鹟 <i>Larvivora sibilans</i>	1		
	红肋蓝尾鹟 <i>Tarsiger cyanurus</i>	4		
	灰背鹟 <i>Turdus hortulorum</i>	3		
	乌灰鹟 <i>Turdus cardis</i>	1		
画眉科 Timaliidae	画眉 <i>Garrulax canorus</i>	1	地表食虫类 Invertivore ground	留鸟 Resident
	棕颈钩嘴鹟 <i>Pomatorhinus ruficollis</i>	3		
山雀科 Paridae	大山雀 <i>Parus major</i>	8	树栖食虫类 Invertivore glean arboreal	留鸟 Resident
	黄腹山雀 <i>Periparus venustulus</i>	19		迁徙 Migratory
鹟科 Muscicapidae	红喉姬鹟 <i>Ficedula parva</i>	3	杂食类 Generalist	迁徙 Migratory
鹟科 Emberizidae	白眉鹟 <i>Emberiza tristrani</i>	13	地表肉食类 Granivore ground	迁徙 Migratory
	栗鹟 <i>E. rutila</i>	1		
绣眼鸟科 Zosteropidae	暗绿绣眼鸟 <i>Zosterops japonicus</i>	16	杂食类 Generalist	留鸟 Resident
	红肋绣眼鸟 <i>Z. erythropleurus</i>	32	树栖食虫类 Invertivore glean arboreal	迁徙 Migratory
鸦科 Corvidae	松鸦 <i>Garrulus glandarius</i>	1	杂食类 Generalist	留鸟 Resident
鸦雀科 Paradoxornithidae	棕头鸦雀 <i>Sinosuthora webbiana</i>	61	杂食类 Generalist	留鸟 Resident
莺科 Sylviidae	褐柳莺 <i>Phylloscopus fuscatus</i>	2	树栖食虫类 Invertivore glean arboreal	迁徙 Migratory
	厚嘴苇莺 <i>Arundinax aedon</i>	3		
	黄眉柳莺 <i>P. inornatus</i>	15		
	极北柳莺 <i>P. borealis</i>	1		
	巨嘴柳莺 <i>P. schwarzi</i>	11		
	强脚树莺 <i>Horornis fortipes</i>	21		留鸟 Resident
	棕脸鹟莺 <i>Abroscopus albogularis</i>	3		
长尾山雀科 Aegithalidae	红头长尾山雀 <i>Aegithalos concinnus</i>	13	树栖食虫类 Invertivore glean arboreal	留鸟 Resident
	银喉长尾山雀 <i>A. caudatus</i>	4		
啄木鸟科 Picidae	斑姬啄木鸟 <i>Picumnus innominatus</i>	1	树干食虫类 Invertivore bark	留鸟 Resident
	大斑啄木鸟 <i>Dendrocopos major</i>	1	杂食类 Generalist	
	灰头绿啄木鸟 <i>Picus canus</i>	1	树干食虫类 Invertivore bark	
	星头啄木鸟 <i>Picoides canicapillus</i>	2	树干食虫类 Invertivore bark	

环志时间为2021年10月10至15日, 为期5.5 d。总共环志到33个物种(12科)。

The ringing was carried out from Oct. 10<sup>th</sup> to 15<sup>th</sup>, in 2021. 33 species from 12 families were banded.

迁徙物种 ( $n = 16$ ) 和留鸟物种 ( $n = 17$ ) 基本呈现随机分布的模式。这意味着本研究当中,

物种迁徙特征对鸟类物种社会网络关系影响不大。

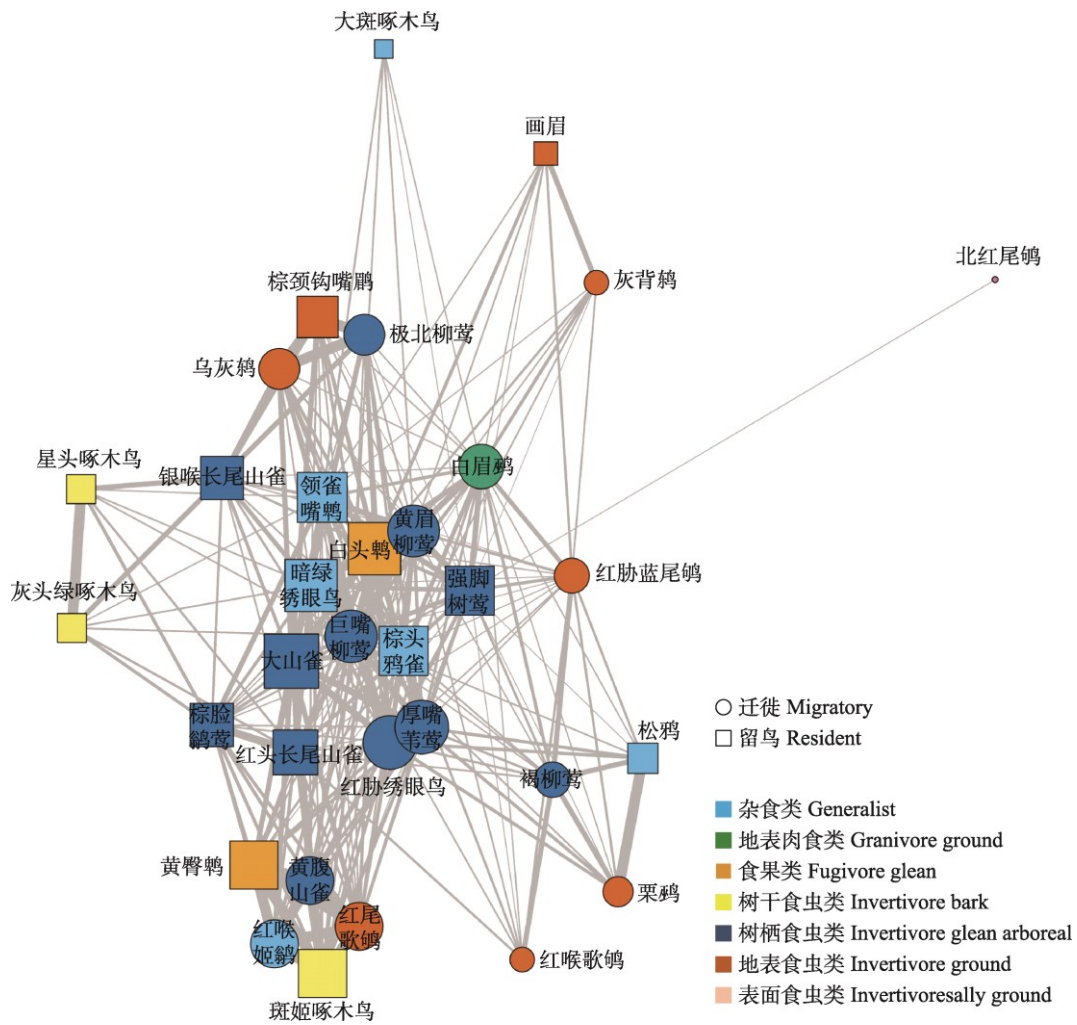


图 1 33 个物种社会网络关系图

Fig. 1 Social network consisted of 33 species in this study using social network analysis

关系图通过社会网络分析程序包‘asnipe’以及社会网络分析结果可视化程序包‘igraph’（R 语言运行）完成。图中形状表示每个物种的迁徙特征。颜色表示物种的食性生态位，总共 7 个食性生态位。物种之间的连线表示这些物种出现在同一个时间分段（集群）。对于某一物种，被其他物种连线越多，表明该物种社会性以及社会连接性越高，则表示该物种的形状越大且一般处于网络中心位置；物种之间连线越多，表示社会连结强度越高，相互之间的距离也越近。

Social network consisted of 33 species in this study using social network analysis (R packages ‘asnipe’ and ‘igraph’). Here, shapes indicate the migration trait of each species (resident or migratory); colors indicate species trophic niche ( $n = 7$  categories); the size of shapes indicates the connectivity of species. Species ( $n = 33$ ) names see Table 1.

社会网络分析并不局限于数据量的大小。在定义群体中两个成员一次社会关联（association）的前提下，原则上来说，只需研究对象群体（如物种集群或个体集群）多于 2 个成员即可。社会关联的定义可以根据研究对

象行为特征和研究目的来设定，一般是在同一时空阶段两个成员的互动行为，例如猴群中两个个体的“相互理毛”，或者是种群中两个雄性个体的“打斗”等。本研究中，我们将两个物种在同一时间“撞网”的“行为”定位为一次

“社会关联”。这是因为物种出现在同一时间并且一起撞网被环志到, 具有一定的社会关联性 (association)。当然, 如果需要更加详细以及更多的生物信息, 可以通过增加研究群体大小或者延长监测时间来获取。关于社会网络分析的使用教程以及更多详细信息参考 Farine 等 (2015)。

本研究通过社会网络分析来描述当地鸟类群落以及物种组成。由于收集数据手段比较局限而且时间较短, 会导致当地鸟类物种多样性并没有全面的调查。本研究我们主要强调运用社会网络分析这种新工具来描述当地鸟类群落物种多样性、探究多物种集群机制的优势。未来研究可以进一步加大数据收集强度、扩宽数据收集手段 (例如人工智能收集) 以及延长数据收集时间, 从而可以全面地调查和描述当地鸟类群落多样性和物种集群的季节动态变化 (动态社会网络分析)。

**致谢** 感谢董寨保护区荒田保护站的工作人员在环志期间提供的协助和辛勤的后勤工作。

## 参 考 文 献

- Aplin L M, Farine, D R, Morand-Ferron J, et al. 2013. Individual personalities predict social behaviour in wild networks of great tits (*Parus major*). *Ecology Letters*, 16(11): 1365–1372.
- Boogert N J, Reader S M, Hoppitt W, et al. 2008. The origin and spread of innovations in starlings. *Animal Behaviour*, 75(4): 1509–1518.
- Clutton-Brock T. 2009. Cooperation between non-kin in animal societies. *Nature*, 462: 51–57.
- Csardi G, Nepusz T J I. 2006. The igraph software package for complex network research. [R/OL]. [2021-12-20]. [https://www.researchgate.net/publication/221995787\\_The\\_Igraph\\_Software\\_Package\\_for\\_Complex\\_Network\\_Research](https://www.researchgate.net/publication/221995787_The_Igraph_Software_Package_for_Complex_Network_Research)
- Dufour P, Descamps S, Chantepie S, et al. 2020. Reconstructing the geographic and climatic origins of long-distance bird migrations. *Journal of Biogeography*, 47(1): 155–166.
- Farine D R. 2013. Animal social network inference and permutations for ecologists in R using asnipe. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(12): 1187–1194.
- Farine D R, Garroway C J, Sheldon B C. 2012. Social network analysis of mixed-species flocks: exploring the structure and evolution of interspecific social behaviour. *Animal Behaviour*, 84(5): 1271–1277.
- Farine D R, Whitehead H. 2015. Constructing, conducting and interpreting animal social network analysis. *Journal of Animal Ecology*, 84(5): 1144–1163.
- Hamede R K, Bashford J, McCallum H, et al. 2009. Contact networks in a wild Tasmanian devil (*Sarcophilus harrisi*) population: using social network analysis to reveal seasonal variability in social behaviour and its implications for transmission of devil facial tumour disease. *Ecology Letters*, 12(11): 1147–1157.
- Jacoby D M P, Fear L N, Sims D W, et al. 2014. Shark personalities? Repeatability of social network traits in a widely distributed predatory fish. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 68: 1995–2003.
- Kendal R L, Custance D M, Kendal J R, et al. 2010. Evidence for social learning in wild lemurs (*Lemur catta*). *Learning & Behavior*, 38(3): 220–234.
- Kokko H, Johnstone R A, Clutton-Brock T H. 2001. The evolution of cooperative breeding through group augmentation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268(1463): 187–196.
- Pigot A L, Sheard C, Miller E T, et al. 2020. Macroevolutionary convergence connects morphological form to ecological function in birds. *Nature Ecology & Evolution*, 4(2): 230.
- R Development Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Snijders L, van Rooij E P, Burt J M, et al. 2014. Social networking in territorial great tits: slow explorers have the least central social network positions. *Animal Behaviour*, 98: 95–102.
- Strandburg-Peshkin A, Twomey C R, Bode N W, et al. 2013. Visual sensory networks and effective information transfer in animal groups. *Current Biology*, 23(17): R709–R711.
- Whitehead H. 2008. *Analyzing Animal Societies*. Chicago: University of Chicago Press.
- 黄华, 张俊峰, 朱家贵, 等. 2019. 董寨国家级自然保护区 2006 ~ 2016 年鸟类环志的初步研究. *绿色科技*, (16): 36–38.
- 刘阳, 陈水华. 2021. 中国鸟类观察手册. 长沙: 湖南科学技术出版社.
- 王代平, 夏灿玮, 张丽君, 等. 2013. 野生动物声音定位系统模拟实验及精度分析. *动物学杂志*, 48(5): 726–731.