



研究论文 ORIGINAL PAPERS

生态过滤机制对吉林省西部 农田防护林繁殖鸟类群落结构的影响

许永珊¹, 续文字², 王海涛², 邹红菲^{1*}

(1. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040;
2. 东北师范大学生命科学学院, 长春 130024)

稿件运行过程

收稿日期: 2024-11-20
修回日期: 2024-12-18



摘要

关键词: 繁殖鸟类群落;
农田防护林;
环境因子;
种间相互作用;
联合物种分布模型

Keywords: Breeding bird assemblage;
Farmland shelterbelt;
Environmental factors;
Interspecific interactions;
Joint species distribution model

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-04-0815-13

DOI: 10.12375/ysdwxb.202411027

鸟类群落是农田生态系统的重要组成部分,对其结构特征的研究有助于为农田生物多样性保护提供理论参考。为揭示生态过滤机制对吉林省西部农田防护林繁殖鸟类群落结构的影响,于2022—2023年每年4月和6月,采用样点法对该区域中的繁殖鸟类群落进行调查,同步记录样点周边的环境变量,并运用联合物种分布模型(joint species distribution model, JSDM)分析环境因子与种间相互作用对鸟类群落的影响。共调查167个样点,记录鸟类17目36科65种。结果表明:吉林省西部农田防护林繁殖期鸟类群落同时受环境因子和种间相互作用的影响,且后者起主导作用。生态位重叠程度较高的鸟类通过资源分割以减少种间竞争。联合物种分布模型分析显示,该地区繁殖鸟类在分布上较为集中,其觅食与繁殖生境较为相似,不同鸟种的种间相互作用进一步影响了物种分布格局,进而对繁殖鸟类群落的组成产生影响。本研究结果为当前农田防护林的合理配置及结构优化提供了理论依据和实践参考。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32271557)

第一作者简介: 许永珊(2000—),女,硕士研究生;主要从事野生动植物保护与利用研究。E-mail:coco-hrb@163.com

*通信作者: 邹红菲, E-mail:hongfeizou@163.com

Effects of Ecological Filtering Mechanisms on the Structure of Breeding Bird Assemblages in Farmland Shelterbelts of Western Jilin Province

XU Yongshan¹, XU Wenyu², WANG Haitao², ZOU Hongfei^{1*}

(1. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. School of Life Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Bird assemblages are important components of farmland ecosystem, and research on the structure of bird assemblages can provide theoretical reference for the protection of biodiversity in field ecosystems. To reveal the effects of ecological filtering mechanisms on the structure of bird assemblage in farmland shelterbelts in western Jilin Province, in April and June of 2022 and 2023, point count method was used to conduct surveys of breeding bird assemblages, the environmental variables of farmland shelterbelts around the sample sites were recorded, and the joint species distribution models (JSDMs) were used to analyze the effects of environmental factors and interspecific interactions on bird assemblages. A total of 167 sample sites were investigated, and 65 species of birds belonging to 36 families and 17 orders were recorded. The results showed that the breeding bird assemblages in farmland shelterbelts in western Jilin Province were affected by both environmental factors and interspecific interactions, on which interspecific interactions dominated. A higher degree of niche overlap among birds led to resource partitioning, reducing interspecific competition. The analysis results of JSDM showed that the breeding birds in farmland shelterbelts of western Jilin Province were distributed relatively concentrated, with similar foraging and breeding environments. The interspecific interactions between different bird species affected the distribution patterns of species and subsequently influenced the composition of the breeding bird assemblages. The study clarified the influence of ecological filtering mechanism on the structure of the breeding bird assemblages in farmland shelterbelts in western Jilin Province and provided a basis for the rational allocation and optimization of the current protective forests.

农业集约化生产是目前生物自然栖息地不断减少的主要驱动因素之一^[1-3]。随着农业活动强度的增加和农作物多样性的下降,农田生物多样性在全球范围内普遍呈衰退趋势^[4]。农田鸟类在广义上指所有在农田景观内进行繁殖或定期觅食的鸟类,狭义上则指以农田作为主要栖息地的鸟类^[5]。农业用地的不断扩张对鸟类栖息地造成了不同程度的影响^[6-7],进而改变了鸟类群落的结构^[8]。群落结构的形成受到生态过滤机制的作用,主要包括环境过滤与生物过滤作用,即群落结构形成主要是物种与环境因子及物种间相互作用的结果^[9-11]。鸟类群落结构不仅与栖息地结构、植被多样性、植物的水平与垂直层次的复杂性等因素相关,同时也与对食物和空间的竞争、互利共生、捕食和寄生等群落内物种间相互作用相关^[12]。鸟类群落在维持农业景观生物多样

性方面具有重要作用^[13-14],对鸟类群落结构的研究有助于揭示区域生物多样性的形成机制,并为区域生物多样性保护与生态环境的持续发展提供理论依据。

三北防护林工程是我国的重大林业生态工程项目,农田防护林作为防护林体系的主要林种^[15],是我国北方地区防风系统的重要组成部分。近年来,农业景观中林地生境在生物多样性保护方面的功能日益受到关注。研究表明,异质性较高、比例较大的非耕作生境能够为鸟类提供更充足的食物资源或更适宜的栖息环境,从而缓解农业集约化对鸟类群落造成的负面影响^[16-20]。目前,国内外关于农田防护林中物种群落的生态学研究多集中于无脊椎动物、植物及小型哺乳动物等类群^[21-24],而针对农田防护林内鸟类群落结构的研究仍相对较少。本研究以吉林

省西部农田防护林系统中的繁殖鸟类群落为对象,开展野外调查,旨在探讨以下问题:(1)农田防护林周边环境因子对繁殖季节鸟类群落中不同物种的影响;(2)农田防护林内繁殖鸟类群落中不同物种间的相互作用模式;(3)以环境因子及种间相互作用对鸟类群落的影响为参考,探究生态过滤机制对农田防护林繁殖鸟类群落结构的调控模式。本研究旨在为现有农田防护林的合理配置及优化提供参考意见,提升农田防护林鸟类多样性保护效果,促进农田生态系统服务功能提升。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省西部松原与白城地区(43°59′—46°18′N,121°38′—126°11′E),总面积136499.47 km²,南北长约604 km,东西宽约588 km。该地区年降水量350~600 mm,年蒸发量1330~1670 mm,蒸发量是降水量的2~4倍。主导风向多为西南风,年平均风速达4~5 m/s,最大风速可达34 m/s。年大风日数一般为16~20 d,多发生于3—5月,大风与干旱同期是该地区气候的显著特征。该地区地处半湿润、半干旱的过渡带,植被主要由人工林、草甸草原植被及泡沼周边的盐生植物群落组成。其中,人工林以杨

树(*Populus* spp.)、旱柳(*Salix matsudana*)、榆(*Ulmus pumila*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)等树种为主。研究区生境主要为村庄-农田生态系统,农耕活动基本实现机械化,景观结构相对单一,主要作物包括玉米、水稻、大豆、花生以及少量其他经济作物。在耕地中,仍存在少量树林、水塘、灌丛、河流和人类建筑物等景观构成的镶嵌结构,其中人工林已基本形成网、带、片相结合的农田林网体系^[25]。

1.2 研究方法

1.2.1 调查方法

调查于2022年和2023年的每年4月及6月各开展一次,每次调查随机选取连续的7~10 d进行,调查期间该地区鸟类处于繁殖期。调查避开下雨或大风天气,每天于日出后3 h内开始,于日落前30 min结束。在调查开始前,依据研究区卫星遥感影像,随机布设农田防护林样点,样点位置涵盖线性防护林林带和防护林斑块,相邻样点间隔1 km以上。本研究共设置167个样点,每次调查覆盖全部样点。野外观察由两名观测人员共同完成。在每个样点持续观察10 min,记录半径50 m范围内观测到的鸟类种类及数量,对于仅在样点上空飞过而未栖落的个体不予记录。调查时使用10×40双筒望远镜,结合鸣声辨认及数码相机观察拍摄等方法对鸟种进行识别。

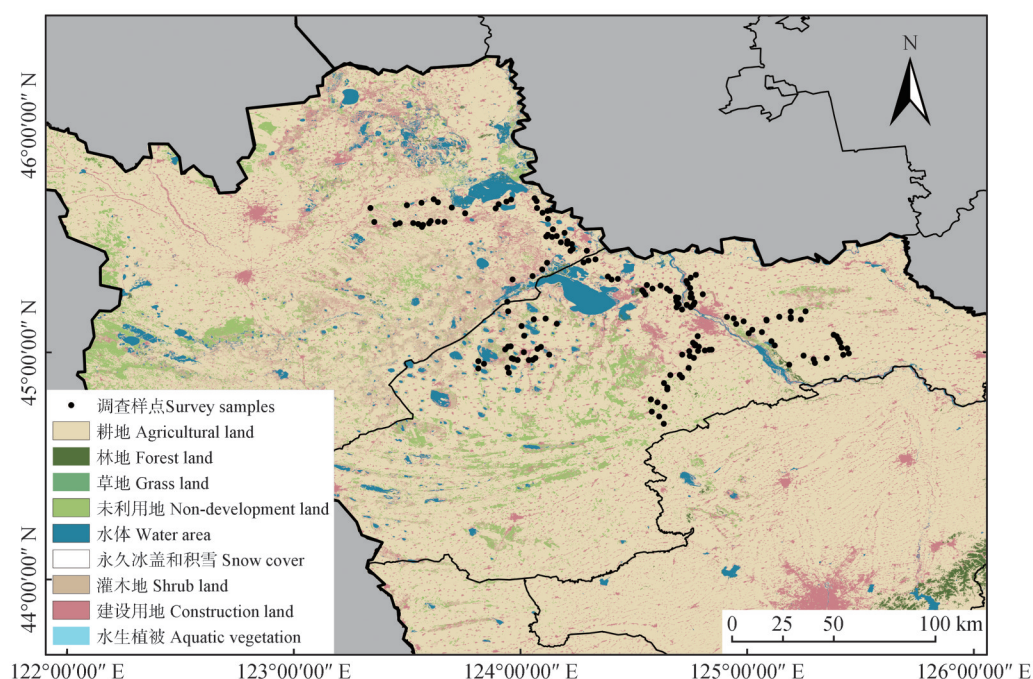


图1 吉林省西部农田防护林研究区样点分布

Figure 1 Distribution of survey sample sites in farmland shelterbelts in western Jilin Province

在调查过程中记录每个样点周边 50 m 范围内农田防护林的环境变量,包括农田防护林乔木行数、种类、平均高度及平均胸径。其中,乔木行数和种类在调查过程中直接记录;平均高度和平均胸径为样点周边 50 m 范围内随机 10 株乔木高度和胸径的平均值。

此外,由于农田生态系统中景观破碎化程度较高,除防护林自身结构外,其周边环境也对鸟类多样性具有一定影响。因此,在调查过程中还记录了样点周边的其他环境因子,包括防护林周边农作物种类、生境类型组成,以及样点到最近居民区的最小距离。所记录的生境类型包括水田、旱田、防护林、河流或人工水渠、村庄及高压输电线塔等。其中,样点周边 50 m 范围内的农作物种类和生境类型在调查

过程中直接记录,样点与居民区的最小距离则基于卫星遥感影像进行测量。

1.2.2 数据分析

利用 R 的 *boral* 软件包构建联合物种分布模型,以分析环境及其他因素对鸟类群落的影响^[26]。为改善数据的稀疏性,在构建模型前剔除低观测概率的鸟种,仅保留在大于 3 个样点观测到的物种用于模型构建^[27]。经筛选,共去除 22 种低观测概率鸟类,最终保留 42 种用于建模。模型共纳入 7 个环境变量(表 1)。其中,防护林林地面积使用样点周边 50 m 范围内的防护林乔木行数表征;乔木丰富度与农作物丰富度分别以各样点记录的乔木或农作物物种数量来衡量;样点周边的生境类型数量为样点周边 50 m 范围内不同生境类型的种类数。

表 1 联合物种分布模型所采用的环境变量

Table 1 Environmental variables used in the joint species distribution models (JSDMs)

环境变量 Environmental variables	变量缩写 Abbreviation for variables
防护林林地面积 Area of shelterbelt woodland	Area
乔木丰富度 Arbor richness	Tsp
乔木平均高度 The average of arbor height	Height
乔木平均胸径 The average of arbor DBH	dbh
样点周边的生境类型数量 The number of habitat types in the vicinity of the sample site	Habitat
样点与居民区的最小距离 The minimum distance between the sample and the living area	Vdistance
农作物丰富度 Crop richness	Csp

在剔除低观测概率的鸟种后,采用 Hui *et al.*^[27]提供的方法构建联合物种分布模型(joint species distribution model, JSDM)。首先,基于鸟类丰度数据拟合纯潜变量模型(latent variable model, LVM),将各样点的观测数据与随机未观测变量进行回归,并依据残差分析结果选择适宜的模型。随后,引入环境协变量,构建相关响应模型(correlated response model, CRM),以区分环境变量导致的种间相关性和由其他变量导致的剩余相关性,并将二者可视化。物种共同出现频率反映了物种间的共存或取代的程度。若物种共现率高于预期,则认为物种间存在显

著正相关;若低于预期,则认为物种间存在显著负相关。在拟合模型的过程中,使用 JAGS(just another gibbs sampler)软件的默认先验分布,并通过马尔科夫链蒙特卡洛(Markov chain Monte Carlo, MCMC)方法估算参数,以评估模型性能^[28]。通过对比潜变量模型与相关响应模型的协变量残差矩阵差异,可量化环境因子对农田鸟类群落影响的贡献比例^[29]。进一步提取相关响应模型中环境变量的后验分布,绘制基于 95% 最大后验密度(highest posterior density, HPD)区间的各物种与环境变量的估计系数可视图,以探究不同物种对环境变量的响应。

2 结果

2.1 农田防护林繁殖鸟类对环境变量的响应

共记录鸟类 17 目 36 科 65 种(表 2)。鸟类物种

的食性、巢型及巢址信息参考王彦平等^[30]发表的中国鸟类物种特征数据集。在记录到的鸟类中,雀形目(Passeriformes)物种数量最多,共 32 种,占总物种数的 49.2%,其余各目鸟类物种数不超过 5 种。

表 2 繁殖季农田鸟类物种名录

Table 2 Bird species list in farmland during the breeding season

物种 Species	生境 Habitat	居留型 Migration status	食性 Food habit	巢型 Nest type	巢址 Nest site
一、鸡形目 GALLIFORMES					
(一)雉科 Phasianidae					
1. 环颈雉 <i>Phasianus colchicus</i>	G, F	R	1	2	1
二、雁形目 ANSERIFORMES					
(二)鸭科 Anatidae					
2. 豆雁 <i>Anser fabalis</i>	W, M, G, L	P	1	2	1
3. 绿头鸭 <i>Anas platyrhynchos</i>	W, M, L	S	1	2	1
4. 斑嘴鸭 <i>Anas zonorhyncha</i>	W, M, L	S	1	2	1
三、鸊鷉目 PODICIPEDIFORMES					
(三)鸊鷉科 Podicipedidae					
5. 小鸊鷉 <i>Tachybaptus ruficollis</i>	W	S	2, 3	2	2
四、鸽形目 COLUMBIFORMES					
(四)鸠鸽科 Columbidae					
6. 灰斑鸠 <i>Streptopelia decaocto</i>	F	S	1	2	3
7. 山斑鸠 <i>Streptopelia orientalis</i>	F	S	1	2	4
五、鸱形目 CUCULIFORMES					
(五)杜鹃科 Cuculidae					
8. 四声杜鹃 <i>Cuculus micropterus</i>	F	S	3	3	-
9. 大杜鹃 <i>Cuculus canorus</i>	F	S	3	3	-
10. 中杜鹃 <i>Cuculus saturatus</i>	F	S	3	3	-
六、鹤形目 GRUIFORMES					
(六)秧鸡科 Rallidae					
11. 白骨顶 <i>Fulica atra</i>	W	S	1	2	2
七、鸻形目 CHARADRIIFORMES					
(七)反嘴鹬科 Recurvirostridae					
12. 黑翅长脚鹬 <i>Himantopus himantopus</i>	M	S	2, 3	2	1
(八)鸻科 Charadriidae					
13. 凤头麦鸡 <i>Vanellus vanellus</i>	M, G	S	1	2	1
14. 灰头麦鸡 <i>Vanellus cinereus</i>	M, G	S	1	2	1
(九)鸥科 Laridae					
15. 灰翅浮鸥 <i>Chlidonias hybrida</i>	W	S	2, 3	2	2
16. 白翅浮鸥 <i>Chlidonias leucopterus</i>	W	S	2, 3	2	2
八、鹮形目 CICONIIFORMES					
(十)鹮科 Ciconiidae					
17. 东方白鹮 <i>Ciconia boyciana</i>	M	S	2, 3	2	4
九、鳾鸟目 SULIFORMES					
(十一)鳾科 Phalacrocoracidae					

续表 2

物种 Species	生境 Habitat	居留型 Migration status	食性 Food habit	巢型 Nest type	巢址 Nest site
18. 普通鸬鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>	W	S	2	2	4
十、鹈形目 PELECANIFORMES					
(十二)鹭科 Ardeidae					
19. 白鹭 <i>Egretta garzetta</i>	M	S	2,3	2	1,4
20. 苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>	M	S	2,3	2	1,4
21. 大白鹭 <i>Ardea alba</i>	M	S	3,2	2	1
22. 大麻鸭 <i>Botaurus stellaris</i>	M	S	2,3	2	1
十一、鹰形目 ACCIPITRIFORMES					
(十三)鹰科 Accipitridae					
23. 毛脚鹫 <i>Buteo lagopus</i>	G,F,L	W	2	2	5
十二、鸱形目 STRIGIFORMES					
(十四)鸱鸃科 Strigidae					
24. 纵纹腹小鸱 <i>Athene noctua</i>	F	R	3,2	1	5
十三、犀鸟目 BUCEROTIFORMES					
(十五)戴胜科 Upupidae					
25. 戴胜 <i>Upupa epops</i>	F,Rs,L	S	3	1	1,4
十四、佛法僧目 CORACIIFORMES					
(十六)翠鸟科 Alcedinidae					
26. 普通翠鸟 <i>Alcedo atthis</i>	W,F	S	2	1	5
十五、啄木鸟目 PICIFORMES					
(十七)啄木鸟科 Picidae					
27. 灰头绿啄木鸟 <i>Picus canus</i>	F	R	3	1	4
28. 大斑啄木鸟 <i>Dendrocopos major</i>	F	R	3	1	4
29. 白背啄木鸟 <i>Dendrocopos leucotos</i>	F	R	3	1	4
30. 星头啄木鸟 <i>Picoides canicapillus</i>	F	R	3	1	4
十六、隼形目 FALCONIFORMES					
(十八)隼科 Falconidae					
31. 燕隼 <i>Falco subbuteo</i>	M,G,F	S	2,3	2	4
32. 红脚隼 <i>Falco amurensis</i>	M,G,F	S	3,2	2	4
33. 红隼 <i>Falco tinnunculus</i>	M,G,F	R	3,2	2	4
十七、雀形目 PASSERIFORMES					
(十九)黄鹡科 Oriolidae					
34. 黑枕黄鹡 <i>Oriolus chinensis</i>	F	S	1	2	4
(二十)山椒鸟科 Campephagidae					
35. 灰山椒鸟 <i>Pericrocotus divaricatus</i>	F	S	3	2	4
(二十一)伯劳科 Laniidae					
36. 红尾伯劳 <i>Lanius cristatus</i>	F	S	3,2	2	3,4
37. 灰伯劳 <i>Lanius borealis</i>	G,F	W	3,2	2	4
(二十二)鸦科 Corvidae					
38. 灰喜鹊 <i>Cyanopica cyanus</i>	G,L,F	R	1	2	4
39. 喜鹊 <i>Pica serica</i>	G,L,F	R	1	2	4
40. 大嘴乌鸦 <i>Corvus macrorhynchos</i>	G,L,F,Rs	R	1	2	4
41. 小嘴乌鸦 <i>Corvus corone</i>	G,L,F,Rs	R	1	2	4

续表2

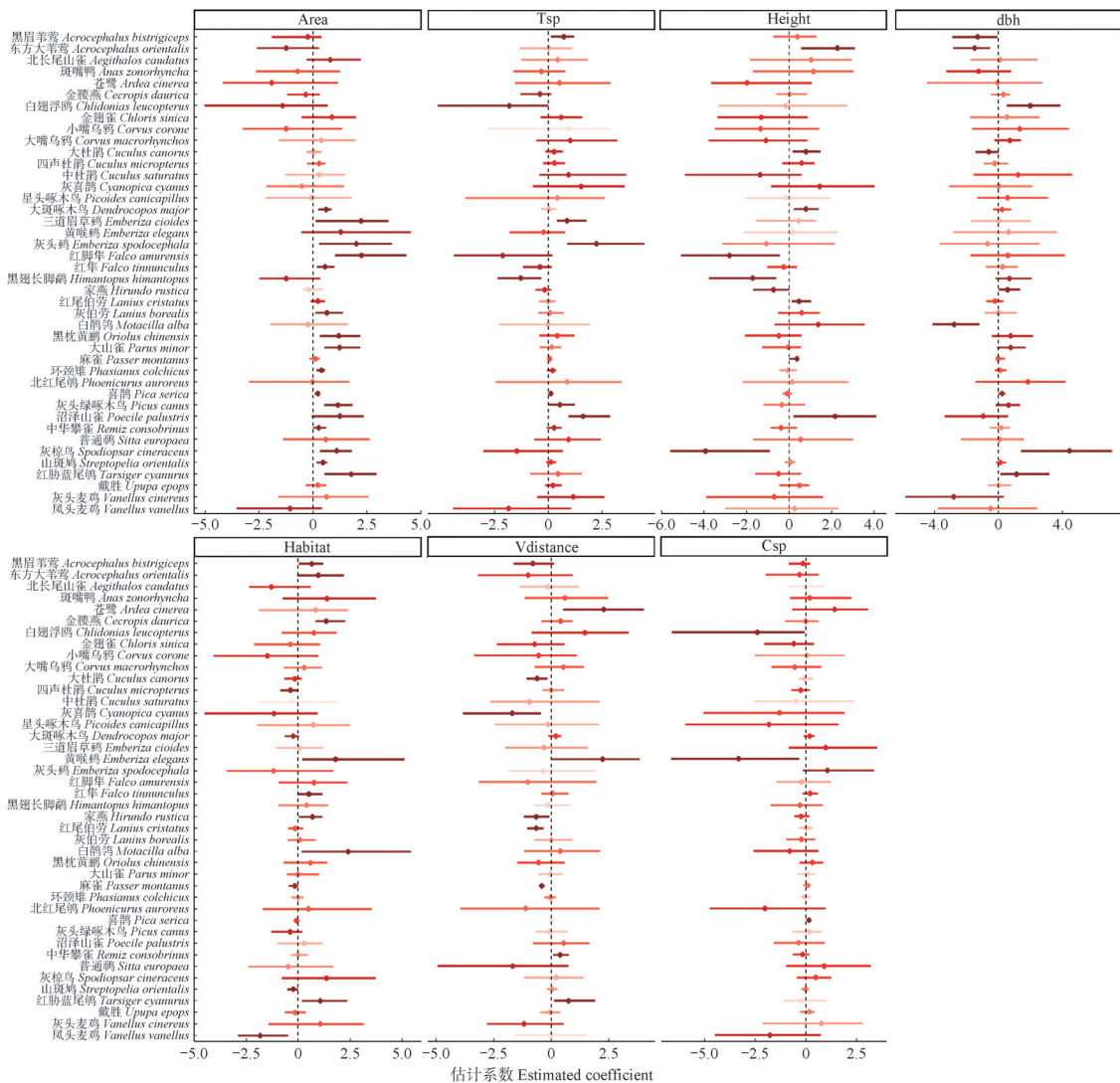
物种 Species	生境 Habitat	居留型 Migration status	食性 Food habit	巢型 Nest type	巢址 Nest site
(二十三)山雀科 Paridae					
42. 大山雀 <i>Parus minor</i>	F	R	3	1	4
43. 沼泽山雀 <i>Poecile palustris</i>	M, F	R	3	1	4
(二十四)攀雀科 Remizidae					
44. 中华攀雀 <i>Remiz consobrinus</i>	F	S	1	2	3, 4
(二十五)燕科 Hirundinidae					
45. 家燕 <i>Hirundo rustica</i>	G, Rs, L	S	3	1	5
46. 金腰燕 <i>Cecropis daurica</i>	G, Rs, L	S	3	1	5
(二十六)柳莺科 Phylloscopidae					
47. 冕柳莺 <i>Phylloscopus coronatus</i>	F	S	3	2	1
(二十七)长尾山雀科 Aegithalidae					
48. 北长尾山雀 <i>Aegithalos caudatus</i>	F	R	3	2	3, 4
(二十八)鹎科 Sittidae					
49. 普通鹎 <i>Sitta europaea</i>	F	R	3	1	4
(二十九)椋鸟科 Sturnidae					
50. 灰椋鸟 <i>Spodiopsar cineraceus</i>	G, F	S	1	1	4
(三十)鸫科 Turdidae					
51. 灰背鸫 <i>Turdus hortulorum</i>	G, L, F	S	1	2	3
(三十一)鹟科 Muscicapidae					
52. 红喉歌鸫 <i>Calliope calliope</i>	M, F	S	3	2	1
53. 红胁蓝尾鸫 <i>Tarsiger cyanurus</i>	F	P	3	2	1
54. 北红尾鸫 <i>Phoenicurus auroreus</i>	Rs, F	S	3	2	1
(三十二)雀科 Passeridae					
55. 麻雀 <i>Passer montanus</i>	L, F, Rs	R	1	1	5
(三十三)鹁鸪科 Motacillidae					
56. 灰鹁鸪 <i>Motacilla cinerea</i>	M, G, F	S	3	2	1
57. 白鹁鸪 <i>Motacilla alba</i>	M, G, F	S	3	2	1
(三十四)燕雀科 Fringillidae					
58. 金翅雀 <i>Chloris sinica</i>	F, G	R	1	2	4
59. 燕雀 <i>Fringilla montifringilla</i>	L, F	P	1	2	3
(三十五)鹀科 Emberizidae					
60. 黄喉鹀 <i>Emberiza elegans</i>	G, L	S	1	2	3
61. 灰头鹀 <i>Emberiza spodocephala</i>	M, G, L	S	1	2	3
62. 三道眉草鹀 <i>Emberiza cioides</i>	G	R	1	2	3
63. 小鹀 <i>Emberiza pusilla</i>	G	P	1	2	1
(三十六)苇莺科 Acrocephalidae					
64. 东方大苇莺 <i>Acrocephalus orientalis</i>	M	S	3	2	3
65. 黑眉苇莺 <i>Acrocephalus bistrigiceps</i>	M	S	3	2	3

注: 在生境中, W. 水域; M. 沼泽; F. 森林、灌丛; Rs. 居民区; G. 草甸; L. 农田、荒地。在居留型中, S. 夏候鸟; R. 留鸟; P. 旅鸟。在食性中, 1. 杂食性; 2. 食肉性; 3. 食虫性。在巢型中, 1. 洞巢; 2. 开放巢; 3. 巢寄生。在巢址中, 1. 地面; 2. 水面; 3. 灌丛; 4. 树冠; 5. 岩壁。

Note: In the habitat, W. Water area; M. Swamp; F. Forest and shrub; Rs. Residential area; G. Meadow; L. Farmland and waste land. In the migration status, S. Summer migrant; R. Resident bird; P. Passing bird. In the food habit, 1. Omnivory; 2. Carnivore; 3. Insectivore. In the nest type, 1. Cave nest; 2. Open nest; 3. Brood parasitism. In the nest site, 1. Ground; 2. Water surface; 3. Scrub; 4. Canopy; 5. Rock wall.

对繁殖期农田鸟类群落物种对环境变量的响应分析表明,当95%HPD区间内不包括0时,可认为环境因子对物种的平均影响具有显著性(图2)。不同鸟种对环境因子的响应存在差异,且同一物种对不同环境变量的响应强度也有所不同。共有16种鸟(约占全部鸟种的38.1%)对防护林林地面积显著响应,且均呈显著正相关关系。8种鸟(占19.0%)对乔木丰富度显著响应,其中黑眉苇莺(*Acrocephalus bistrigiceps*)、三道眉草鹀(*Emberiza cioides*)、灰头鹀(*E. spodocephala*)、喜鹊(*Pica serica*)、灰头绿啄木鸟(*Picus canus*)和沼泽山雀(*Poecile palustris*)与乔木丰富度呈显著正相关,而白翅浮鸥(*Chlidonias leucopterus*)和黑翅长脚鹬(*Himan-*

topus himantopus)与其呈显著负相关。10种鸟(占23.8%)对乔木平均高度显著响应,其中东方大苇莺(*Acrocephalus orientalis*)、大杜鹃(*Cuculus canorus*)、大斑啄木鸟(*Dendrocopos major*)、红尾伯劳(*Lanius cristatus*)、麻雀(*Passer montanus*)和沼泽山雀与乔木平均高度呈显著正相关,红脚隼(*Falco amurensis*)、黑翅长脚鹬、家燕(*Hirundo rustica*)和灰椋鸟(*Spodiopsar cinereus*)与其呈显著负相关。此外,8种鸟(占19.0%)对乔木平均胸径具有显著响应,其中白翅浮鸥、家燕、灰椋鸟和红胁蓝尾鸲(*Tarsiger cyanurus*)与乔木平均胸径呈显著正相关,而黑眉苇莺、东方大苇莺、大杜鹃和白鹡鸰(*Motacilla alba*)与其呈显著负相关。



图中的点表示系数的后验中值,水平线表示95%最大后验密度(highest posterior density, HPD)区间。垂直虚线代表零值。包含零值的HPD区间为浅红色,不包含零值的HPD区间为深红色。

The dots represent the posterior median of the coefficient, and the horizontal line indicates the 95% highest posterior density (HPD) intervals. The vertical dashed line denotes the zero value. HPD intervals that include zero are shaded light red, while those excluding zero are shaded dark red.

图2 繁殖季农田鸟类与各环境变量的估计系数

Figure 2 Estimated coefficients of each environmental covariate for birds in farmland during the breeding season

农田鸟类物种丰度对样点周边其他环境因子的响应不同(图2)。共有13种鸟类(占全部鸟类的31.0%)对生境类型数量具有显著响应。其中,黑眉苇莺、东方大苇莺、金腰燕(*Cecropis daurica*)、黄喉鹀(*Emberiza elegans*)、红隼(*Falco tinnunculus*)、家燕、白鹡鸰和红胁蓝尾鸲与生境类型数量呈显著正相关,而四声杜鹃(*Cuculus micropterus*)、麻雀、山斑鸠(*Streptopelia orientalis*)、大斑啄木鸟、灰椋鸟和凤头麦鸡(*Vanellus vanellus*)与其呈显著负相关。对样点与居民区的最小距离显著响应的物种共计10种(占23.8%),其中苍鹭(*Ardea cinerea*)、黄喉鹀、中华攀雀(*Remiz consobrinus*)和红胁蓝尾鸲与该距离呈显著正相关,大杜鹃、灰喜鹊(*Cyanopica cyanus*)、家燕、红尾伯劳、黑眉苇莺和麻雀与其呈显著负相关。此外,仅有3种鸟(占7.1%)对农作物丰富度显著响应。喜鹊与农作物丰富度呈显著正相关,而白翅浮鸥和黄喉鹀与其呈显著负相关。

2.2 农田防护林繁殖鸟类群落内的种间相互作用

通过比较纯潜变量模型与相关响应模型发现,协变量残差矩阵的估计值从193.58降至167.87,表明本研究选取的环境协变量能够解释繁殖季节农田鸟类群落中约13%的物种共现现象,即环境因子对繁殖季节鸟类群落的贡献比例约为13%。

对繁殖期农田鸟类群落的种间相互作用分析显示,当物种共同出现频率显著高于或低于预期时,物种间分别表现出显著的正相关或负相关关系($\alpha = 0.05$,图3)。在由环境协变量导致的成对物种相关性中,不显著相关性的有688对,约占全部成对物种相关性的79.9%;显著正相关122种,占14.1%;显著负相关51种,占5.9%(图3(a))。其中,大山雀(*Parus minor*)和大斑啄木鸟分别与13种鸟类呈显著正相关,苍鹭和黑翅长脚鹬分别与9种和8种鸟类呈显著负相关。

在分离环境因子的影响后,剩余相关性中不显著相关有767对,约占全部成对物种相关性的89.1%;显著正相关74对,占8.6%;显著负相关20对,占2.3%(图3(b))。白翅浮鸥和北长尾山雀(*Aegithalos caudatus*)分别与11种和7种鸟类呈显著正相关,东方大苇莺和大杜鹃分别与5种和4种鸟类呈显著负相关。

3 讨论

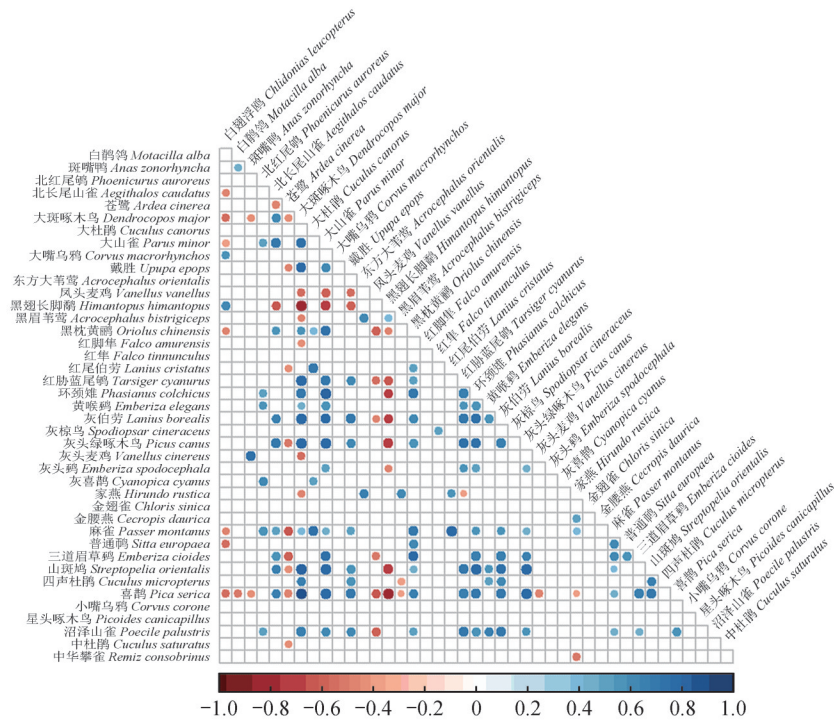
3.1 生态过滤机制对农田防护林繁殖鸟类群落结构的调控模式

小尺度下生物群落的物种分布和共现模式主要受生态过滤机制的调控^[31]。已有大量研究证实栖息地质量与鸟类多样性呈正相关关系^[32],且栖息地质量对鸟类群落结构、种群密度及繁殖成功率均具有直接影响^[33-34]。在农业景观中,非耕作生境受人为干扰较小,可为野生动物提供庇护场所、越冬地、食物资源和物种源等^[35-36]。吉林省西部地区农田为集约化程度较高的同质化景观,农田防护林作为其中重要的异质性林地生境,其繁殖鸟类群落同时受到环境因子和种间相互作用的影响。由于大量资源需求相近的鸟类集中选择农田防护林作为栖息地,群落内种间相互作用较强,其对群落结构的影响甚至超过环境因子的作用。

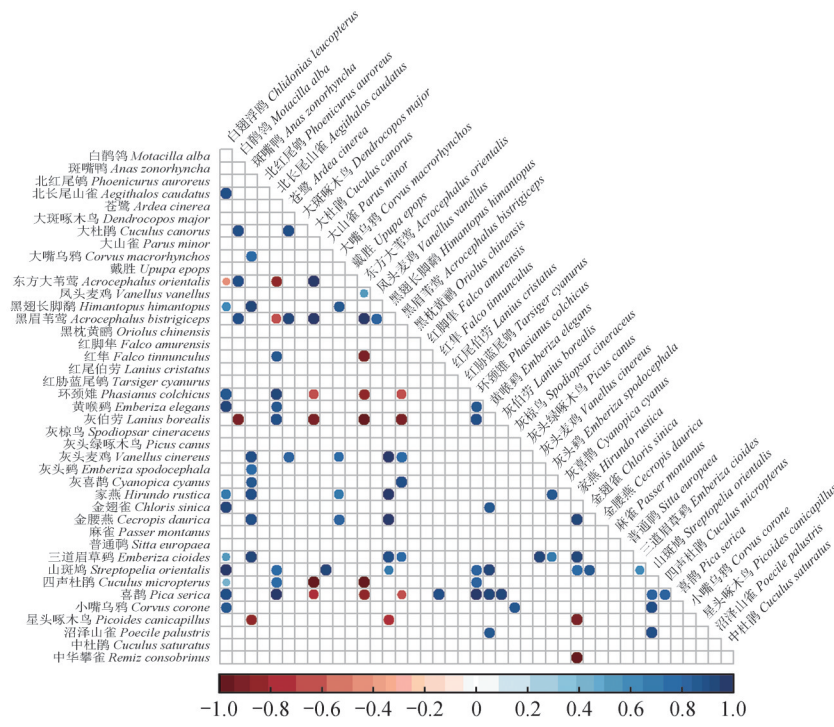
3.2 农田防护林周边环境因子对繁殖季节鸟类群落不同物种的影响

鸟类在繁殖季节倾向选择植被茂密的林地用于筑巢、繁殖和躲避天敌。大面积的植被斑块对农业活动带来的人为干扰具有一定缓冲作用^[37],为农田鸟类提供了重要的繁殖与觅食生境。三道眉草鹀、灰头鹀、灰椋鸟均为在农田防护林中筑巢繁殖的杂食性鸟类,夏季以昆虫为主要食物,而冬季则以植物种子、果实等为食^[38]。本研究显示,上述鸟类对环境因子的响应模式较为相似,其物种丰度均与防护林面积和周边农作物丰富度呈显著正相关,表明它们更偏好林带面积较大、周边作物类型丰富的生境。尽管杂食性鸟类在繁殖期更多捕食昆虫^[39-40],但在繁殖初期,农田中的作物种子可以为提供更多食物。吉林西部农田普遍实行机械化收割,春季农田内会遗留大量上年度收割时散落的作物种子,这使得农作物丰富度对杂食性鸟类分布的影响尤为显著。

物种共存理论认为,生态位完全重叠的物种无法长期稳定共存,群落内的不同物种如果要共存则必须有生态位的分化^[41]。在本研究中,大山雀与沼泽山雀对环境因子的响应一致程度较高,说明二者在栖息地选择和取食习性上较为接近,生态位重叠较大。已有研究表明,大山雀与沼泽山雀通过取食行为和形态特征的差异实现资源利用上的分化,从



(a) 环境变量导致的相关性
(a) Correlations due to abiotic covariates



(b) 剩余相关性
(b) Residual correlations

图3 繁殖季农田鸟类群落的种间相关性

Figure 3 Correlations between species of bird colonies in farmland during the breeding season

而共存在同一次生阔叶林中,最大限度降低种间竞争^[42],本研究的结论与此一致。

3.3 物种间的种间相互作用对农田防护林繁殖鸟类群落的影响

联合物种分布模型通过成对物种共现率反映物种间共存或取代的程度,其中环境协变量导致的种间相关性可用于识别具有相似或相反环境需求的物种^[26]。呈正相关的物种可能具有较为相似的觅食与繁殖需求,功能性状对不同环境协变量的响应一致性较高,因而多个物种共存于同一片栖息地。在本研究中,大山雀与大斑啄木鸟、灰头绿啄木鸟和戴胜(*Upupa epops*)均呈显著正相关,这些鸟类均为食虫性洞巢鸟,且物种丰度均与防护林面积和乔木平均胸径呈显著正相关,说明其偏好在林地面积及乔木平均胸径均较大的农田防护林内栖息。农业生产活动中化肥与杀虫剂的使用大幅度地降低了农田昆虫数量,影响了食虫鸟类的食物来源^[43],使其更倾向选择面积较大、人为干扰程度相对较低的生境;同时,乔木平均胸径较大的林地可以为洞巢鸟提供更多适宜的巢址。若环境协变量导致的成对种间相关性表现为负相关,则可能反映其觅食和繁殖生境存在较大差异,例如黑翅长脚鹬与大斑啄木鸟、家燕与红胁蓝尾鸂鶒等。水田与旱田中的农用堤道、水塘等为喜好开阔生境的黑翅长脚鹬、白翅浮鸥等水鸟提供了用于筑巢的湿地生境及食物资源,而农田防护林能提供的是与之不同的食物及栖息地,更适合大斑啄木鸟等利用林地生境筑巢的鸟类。此外,麻雀、家燕等伴人鸟种与样点距居民区的最小距离呈显著负相关,其栖息地多分布在人类集居的地方,与其他鸟类栖息地差别较大。

潜变量导致的剩余相关性是指将影响物种分布模式的环境因子驱动力分离后所剩余的种间关系驱动力。在潜变量导致的剩余相关性中,显著的正相关性反映了以正相互作用为主导的种间关系,如原始协作、互利共生等^[44]。例如,金腰燕与家燕间表现出显著正相关,二者生态习性相近,均以飞行性昆虫作为主要的食物来源,常混群在村庄内筑巢繁殖并在附近的农田活动,形成混合物种群体。当任一物种发出警报鸣声时,另一种也能识别并响应^[45]。喜鹊与红脚隼间正相关性可能与红脚隼常利用喜鹊的废巢繁殖有关^[46]。巢寄生行为也可能是导致正相关的原因之一。在本研究中,大杜鹃与其常见宿主白

鹊、东方大苇莺和黑眉苇莺均呈显著正相关,表明寄生性鸟类的分布显著受宿主分布的影响^[47-48]。相反,大杜鹃与四声杜鹃之间呈显著负相关,二者同为巢寄生鸟,生态位高度重叠,可能存在较为强烈的竞争关系。此外,潜变量导致的剩余相关性表现为负相关的情况并非都反映负面的种间相互作用,也可能源于未观测的环境驱动因子、迁移历史或系统发育背景等因素^[49]。具有特殊的栖息地偏好并占据独特生态位空间的物种可能常与其他物种呈负相关,这种情况在家燕、喜鹊等伴人鸟种中较为常见。

4 结论

农田防护林作为研究区内占比较大的非耕作生境,为鸟类提供了觅食、隐蔽和繁殖场所,在繁殖季节对农田鸟类多样性具有显著积极作用。繁殖期鸟类群落结构受生态过滤机制调控,物种与环境因子及物种之间相互作用的影响作用于鸟类群落中的各个物种,其中种间相互作用占据主导地位。

尽管不同鸟类对农田防护林环境因子的偏好各不相同,但多数鸟类倾向选择食物资源丰富、人类干扰程度较低的栖息地。生态位重叠较高的鸟类会通过资源分割的方式利用不同的资源位,尽可能降低二者之间的竞争程度。

繁殖季节农田防护林中大部分鸟类的觅食和繁殖生境较为相似,物种分布较为集中。在分离环境变量对物种分布模式的影响后,物种间正向或负向相互作用进一步影响物种分布模式,从而对繁殖鸟类群落的组成产生影响。

5 保护建议

在农田鸟类多样性保护中,考虑生态过滤机制对鸟类群落结构的影响可以更加有效地实现对鸟类群落的保护。建议在未来的农业景观规划与生物多样性保护中,在保护耕地面积的前提下尽量扩大农田防护林面积,减少人类活动对林内鸟类的干扰。同时,应改变当前以乔木为主的单一林分结构,增加林下植被的多样性,提升农田防护林现有林地的生境异质性,可以有效发挥其在维持生物多样性方面的功能。

参考文献:

- [1] GIBBS H K, RUESCH A S, ACHARD F, *et al.* Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and

- 1990s[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(38): 16732-16737.
- [2] GUERRERO I, DUQUE D, OÑATE J J, *et al.* Agricultural intensification affects birds' trait diversity across Europe [J]. Basic and Applied Ecology, 2024, 74: 40-48.
- [3] TILMAN D, BALZER C, HILL J, *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [4] HOFFMANN J, WITTCHEN U, STACHOW U, *et al.* Identification of habitat requirements of farmland birds based on a hierarchical structured monitoring scheme [J]. Chinese Birds, 2013, 4(4): 265-280.
- [5] NEWTON I. The recent declines of farmland bird populations in Britain: An appraisal of causal factors and conservation actions [J]. Ibis, 2004, 146(4): 579-600.
- [6] ZHANG M X, XU Y Q, LI J B, *et al.* Traditional paddy field-supported bird diversity ignored by forest-focused protection of ecosystems in tropical China [J]. Ecology and Evolution, 2024, 14(5): e11408.
- [7] FOLEY J A, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K A, *et al.* Solutions for a cultivated planet [J]. Nature, 2011, 478(7369): 337-342.
- [8] BURGHARDT K T, TALLAMY D W, GREGORY SHRIVER W. Impact of native plants on bird and butterfly biodiversity in suburban landscapes [J]. Conservation Biology, 2009, 23(1): 219-224.
- [9] DRAKE J A. Community-assembly mechanics and the structure of an experimental species ensemble [J]. The American Naturalist, 1991, 137(1): 1-26.
- [10] CHASE J M. Community assembly: When should history matter? [J]. Oecologia, 2003, 136(4): 489-498.
- [11] FUKAMI T, NAKAJIMA M. Community assembly: Alternative stable states or alternative transient states? [J]. Ecology Letters, 2011, 14(10): 973-984.
- [12] EHRLÉN J, MORRIS W F. Predicting changes in the distribution and abundance of species under environmental change [J]. Ecology Letters, 2015, 18(3): 303-314.
- [13] PERFECTO I, VANDERMEER J H, BAUTISTA G L, *et al.* Greater predation in shaded coffee farms: The role of resident neotropical birds [J]. Ecology, 2004, 85(10): 2677-2681.
- [14] GRASS I, LEHMANN K, THIES C, *et al.* Insectivorous birds disrupt biological control of cereal aphids [J]. Ecology, 2017, 98(6): 1583-1590.
- [15] 朱教君, 郑晓. 关于三北防护林体系建设的思考与展望: 基于40年建设综合评估结果 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1600-1610.
- ZHU J J, ZHENG X. The prospects of development of the Three-North Afforestation Program (TNAP): On the basis of the results of the 40-year construction general assessment of the TNAP [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(5): 1600-1610.
- [16] BIRCH B D J, MILLS S C, SOCOLAR J B, *et al.* Land sparing outperforms land sharing for Amazonian bird communities regardless of surrounding landscape context [J]. Journal of Applied Ecology, 2024, 61(5): 940-950.
- [17] 张艳妮, 王文玲, 郑冰权, 等. 农田生境对大熊猫国家公园鸟类多样性的维持作用 [J]. 国家公园, 2023, 1(3): 135-150.
- ZHANG Y N, WANG W L, ZHENG B Q, *et al.* The role of cropland in maintaining bird diversity in Giant Panda National Park [J]. National Park, 2023, 1(3): 135-150.
- [18] TSCHARNTKE T, KLEIN A M, KRUESS A, *et al.* Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity: Ecosystem service management [J]. Ecology Letters, 2005, 8(8): 857-874.
- [19] ASSANDRI G, BAZZI G, SIDDI L, *et al.* The occurrence of a flagship raptor species in intensive agroecosystems is associated with more diverse farmland bird communities: Opportunities for market-based conservation [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 349: 108441.
- [20] FIEDLER A K, LANDIS D A, WRATTEN S D. Maximizing ecosystem services from conservation biological control: The role of habitat management [J]. Biological Control, 2008, 45(2): 254-271.
- [21] 林思亮, 周训军, 兴安, 等. 东北农牧交错带南段啮齿动物群落结构及与环境因子的关系 [J]. 植物保护, 2024, 50(4): 126-134.
- LIN S L, ZHOU X J, XING A, *et al.* Relationship between rodent community structure and environmental factors in the southern part of the northeast agro-pastoral ecotone [J]. Plant Protection, 2024, 50(4): 126-134.
- [22] CRITCHLEY C N R, WILSON L A, MOLE A C, *et al.* A functional classification of herbaceous hedgerow vegetation for setting restoration objectives [J]. Biodiversity and Conservation, 2013, 22(3): 701-717.
- [23] 缪弘志, 罗慧琴, 徐晨晟, 等. 减量施肥对冬小麦休闲期农田杂草物种多样性及生态化学计量特征的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 136-145.
- MIAO H Z, LUO H Q, XU C S, *et al.* Effects of reduced fertilization on weeds species diversity and ecological stoichiometry characteristics during the fallow period of winter wheat [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024, 52(4): 136-145.
- [24] 边振兴, 杨祎博, 果晓玉, 等. 农田防护林对田间地表节肢动物分布的影响: 以昌图县为例 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1835-1846.
- BIAN Z X, YANG Y B, GUO X Y, *et al.* The effects of farmland shelterbelts on surface arthropod distribution: A case study in Changtu County, China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1835-1846.
- [25] 翟羽娟. 吉林省西部农牧交错区土地利用/覆被变化及其生态效应研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- ZHAI Y J. Study on land use/cover change and its ecological effects in the agro-pastoral ecotone of western Jilin Province [D].

- Changchun: Jilin University, 2023.
- [26] HAN Z, ZHANG L S, JIANG Y L, *et al.* Unravelling species co-occurrence in a steppe bird community of Inner Mongolia: Insights for the conservation of the endangered Jankowski's Bunting [J]. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(7): 843-852.
- [27] HUI F K C. Boral: Bayesian ordination and regression analysis of multivariate abundance data in R [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(6): 744-750.
- [28] TIKHONOV G, OPEDAL Ø H, ABREGO N, *et al.* Joint species distribution modelling with the R-package Hmsc [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2020, 11(3): 442-447.
- [29] WARTON D I, BLANCHET F G, O'HARA R B, *et al.* So many variables: Joint modeling in community ecology [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(12): 766-779.
- [30] 王彦平, 宋云枫, 钟雨茜, 等. 中国鸟类的生活史和生态学特征数据集 [J]. *生物多样性*, 2021, 29(9): 1149-1153.
WANG Y P, SONG Y F, ZHONG Y X, *et al.* A dataset on the life-history and ecological traits of Chinese birds [J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(9): 1149-1153.
- [31] SANÍN C, ANDERSON R P. A framework for simultaneous tests of abiotic, biotic, and historical drivers of species distributions: Empirical tests for North American wood warblers based on climate and pollen [J]. *The American Naturalist*, 2018, 192(2): E48-E61.
- [32] 陈水华, 丁平, 郑光美, 等. 岛屿栖息地鸟类群落的丰富度及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 141-149.
CHEN S H, DING P, ZHENG G M, *et al.* The richness of island habitat avian communities and their influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 141-149.
- [33] 王春晓, 何建华, 刘殿锋, 等. 土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响: 以鄂州市为例 [J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4197-4208.
WANG C X, HE J H, LIU D F, *et al.* Impact of land use change on bird habitat connectivity: A case study in Ezhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4197-4208.
- [34] 李家兴, MAMMIDES C, 周丽萍, 等. 广西山地农业化背景下鸟类多样性比较 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(5): 21515.
LI J X, MAMMIDES C, ZHOU L P, *et al.* Bird diversity in different habitats under agriculturalization in Guangxi, China [J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(5): 21515.
- [35] FAHRIG L, BAUDRY J, BROTONS L, *et al.* Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 101-112.
- [36] CARVALHEIRO L G, SEYMOUR C L, NICOLSON S W, *et al.* Creating patches of native flowers facilitates crop pollination in large agricultural fields: Mango as a case study [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(6): 1373-1383.
- [37] MÖRTBERG U M. Resident bird species in urban forest remnants; landscape and habitat perspectives [J]. *Landscape Ecology*, 2001, 16(3): 193-203.
- [38] ANDERLE M, PANICCIA C, BRAMBILLA M, *et al.* The contribution of landscape features, climate and topography in shaping taxonomical and functional diversity of avian communities in a heterogeneous Alpine region [J]. *Oecologia*, 2022, 199(3): 499-512.
- [39] KNOZOWSKI P, NOWAKOWSKI J J, STAWICKA A M, *et al.* Effect of nature protection and management of grassland on biodiversity: Case from Big Flooded River Valley (NE Poland) [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165280.
- [40] KAJTOCH Ł. Loss of traditional orchards and its impact on the occurrence of threatened tree-dwelling bird species [J]. *Agriculture*, 2023, 13(12): 2267.
- [41] HILLERISLAMBERS J, ADLER P B, HARPOLE W S, *et al.* Rethinking community assembly through the lens of coexistence theory [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43: 227-248.
- [42] 高玮, 相桂权, 冯贺林, 等. 次生阔叶林中大山雀和沼泽山雀取食行为的研究 [J]. *生态学杂志*, 1996, 15(5): 1-5.
GAO W, XIANG G Q, FENG H L, *et al.* On changes of foraging behavior of the tits of two species in secondary deciduous wood [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, 15(5): 1-5.
- [43] 宋志帆, 周学红, 王强, 等. 农田鸟类生存制约因子及保护对策综述 [J]. *野生动物学报*, 2019, 40(4): 1063-1069.
SONG Z F, ZHOU X H, WANG Q, *et al.* Restrictive factors for the survival of farmland birds and protection countermeasures [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2019, 40(4): 1063-1069.
- [44] MORALES-CASTILLA I, MATIAS M G, GRAVEL D, *et al.* Inferring biotic interactions from proxies [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(6): 347-356.
- [45] 田丽, 周材权, 胡锦涛. 南充金腰燕、家燕繁殖生态比较及易卵易雏实验 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 170-174.
TIAN L, ZHOU C Q, HU J C. Comparative breeding ecology of barn swallow and red-rumped swallow in Nanchong and an experiment of interchanging their eggs and nestlings [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 170-174.
- [46] 时鲲, 丁汉林. 红脚隼的繁殖生态 [J]. *吉林林业科技*, 1988, 17(2): 25-27.
SHI K, DING H L. Reproductive ecology of red-footed falcon [J]. *Forestry Science and Technology*, 1988, 17(2): 25-27.
- [47] DUCATEZ S. Brood parasitism: A good strategy in our changing world? [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 281(1780): 20132404.
- [48] LEE J W, NOH H J, LEE Y, *et al.* Spatial patterns, ecological niches, and interspecific competition of avian brood parasites: Inferring from a case study of Korea [J]. *Ecology and Evolution*, 2014, 4(18): 3689-3702.
- [49] DORMANN C F, BOBROWSKI M, DEHLING D M, *et al.* Biotic interactions in species distribution modelling: 10 questions to guide interpretation and avoid false conclusions [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(9): 1004-1016.