

DOI: 10.20103/j.stxb.202403060455

马晓慧, 于亚辉, 郭莉, 邢亚楠, 冯晨, 车喜庆, 刘郁, 桑海旭. 辽河流域稻蟹共作系统主要蜘蛛生态位. 生态学报, 2024, 44(20): 9242-9251.

Ma X H, Yu Y H, Guo L, Xing Y N, Feng C, Che X Q, Liu Y, Sang H X. Ecological niche of main spiders in rice-crab co-culture system in Liaohe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9242-9251.

辽河流域稻蟹共作系统主要蜘蛛生态位

马晓慧¹, 于亚辉^{1,*}, 郭莉¹, 邢亚楠¹, 冯晨², 车喜庆¹, 刘郁¹, 桑海旭¹

1 辽宁省盐碱地利用研究所, 盘锦 124010

2 辽宁省农业科学院耕作栽培研究所, 沈阳 110161

摘要: 稻蟹共作是利用种间互利共生、食物链、生态位等理论, 有效地将水稻生产和水产养殖相结合的稻田综合种养模式, 对推动农业生态发展具有重要意义。蜘蛛是稻田重要的捕食性天敌, 为探明稻蟹共作系统中主要蜘蛛生态位特征, 在时间、空间维度上对常规稻田和稻蟹共作田中主要蜘蛛种类、数量进行调查, 并采用生态位理论方法, 系统地分析了主要蜘蛛生态位宽度和重叠特征, 结果表明: (1) 两处理稻田共调查蜘蛛 892 头, 隶属于 10 科共 30 种, 其中稻蟹田蜘蛛占比 57.96%, 比常规田多 15.92%; 狼蛛、皿蛛、肖蛸在两处理田中数量均居前列, 其中, 狼蛛数量最多, 每调查点分别为 (18.60±1.17) 头 (常规田)、(26.00±2.39) 头 (稻蟹田); 两处理田中的逍遥蛛和漏斗蛛数量较少。 (2) 时间维度上, 稻蟹共作系统中狼蛛、皿蛛、跳蛛生态位宽度增加, 肖蛸生态位宽度减小; 空间维度上, 稻蟹共作系统中狼蛛、皿蛛、肖蛸生态位宽度增加, 管巢蛛生态位宽度减小; 时空二维角度, 稻蟹共作系统中狼蛛、皿蛛生态位宽度增加, 增幅分别为 49.64% 和 47.49%, 管巢蛛生态位宽度下降, 降幅为 25.04%。 (3) 稻蟹共作系统蜘蛛时空二维生态位重叠指数和相似性比例指数多数表现为增大或持平, 仅管巢蛛与园蛛、肖蛸的指数下降。研究首次探讨分析了稻蟹共作系统主要蜘蛛生态位特征, 稻蟹共作通过影响蜘蛛在稻田环境中的活动强度、分布格局与数量结构, 不同程度地改变了蜘蛛时间、空间生态位及其重叠和相似性特征, 当竞争加剧时, 蜘蛛将增大对较多资源序列利用的程度, 从而更好地发挥控虫能力。

关键词: 稻蟹共作; 蜘蛛; 资源利用; 生态位

Ecological niche of main spiders in rice-crab co-culture system in Liaohe River Basin

MA Xiaohui¹, YU Yahui^{1,*}, GUO Li¹, XING Yanan¹, FENG Chen², CHE Xiqing¹, LIU Yu¹, SANG Haixu¹

1 Liaoning Saline or Alkaline Land Utilization and Research Institute, Panjin 124010, China

2 Tillage and Cultivation Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China

Abstract: Rice-crab co-culture (RC) is an integrated cropping-culture pattern that combines rice and aquaculture production by using the theories of interspecific mutualism, food chain, and ecological niche, it is important for advancing the development of agro-ecology. Spiders are important predatory natural enemies in rice fields, to find out the environmental niche characteristics of major spiders in RC system, this study investigated the species and quantity of major spiders in the conventional rice fields and rice-crab co-culture fields on temporal and spatial scales and analyzed the niche width and overlap of spiders by using the niche theory. The results showed that: (1) 892 spiders belonging to 30 species of 10 families were investigated in the rice fields. The proportion of spiders in RC fields was 57.96%, 15.92% more than in conventional rice fields. The numbers of Lycosidae, Linyphiidae, and Tetragnathidae in the two treated fields ranked in the

基金项目: 辽宁省农业重大专项 (2022JH1/10200003); 辽宁省应用基础研究计划 (2022JH2/101300161); 辽宁省自然科学基金面上项目 (2022-MS-063)

收稿日期: 2024-03-06; **网络出版日期:** 2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyh3655@126.com

top three, and the number of Lycosidae was the highest, with 18.60 ± 1.17 (the conventional rice fields) and 26.00 ± 2.39 (RC rice fields), respectively. (2) In the temporal dimension, the niche width of Lycosidae, Linyphiidae, and Salticidae increased, while that of Tetragnathidae decreased in the RC system. In the spatial dimension, the niche width of Lycosidae, Linyphiidae, and Tetragnathidae increased, while those of Clubionidae decreased in the RC system. From the perspective of temporal-spatial dimensions, the niche width of Lycosidae and Linyphiidae increased significantly by 49.64% and 47.49%, respectively, while that of Clubionidae decreased by 25.04%. (3) The temporal-spatial niche overlap index and niche proportional similarity index of most spiders increased or remained the same in the RC system, however, the index of Clubionidae to Araneidae and Clubionidae to Tetragnathidae decreased. In this study, we first analyzed the ecological niche characteristics of major spiders in the rice-crab cropping system. Rice-crab co-cropping changed the spatial and temporal environmental niches, overlapping ecological niches, and similar ecological niches of spiders to varying degrees by affecting the intensity of spider activity, distribution pattern, and population structure in the paddy field environment. When competition intensified, spiders increased the utilization of more resource sequences to improve insect control. Rice-crab co-culture not only increased the number of spiders, but also changed the degree of spiders' utilization of temporal and spatial resources, resulting in a higher level of resource utilization, a more even distribution, and a longer period of occurrence, and facilitating spiders to perform their pest control role better. This study provides basic data for the study of spider ecological niche in rice-crab fields.

Key Words: rice-crab co-culture (RC); spiders; resource utilization; ecological niche

稻蟹共作基于生态位、食物链等生态经济原理,将水稻栽培与河蟹生产有效地结合,从而达到种间互利共生的生态种植-养殖模式,是我国生态农业主要形式之一^[1]。稻蟹共作生态模式在我国多地分布,其中较为典型的有“辽宁盘山模式”、“吉林稻田养蟹技术模式”、“宁夏稻蟹共作模式”等^[2],稻蟹共作技术的研究主要围绕其对稻田生态环境(土壤、水体、动植物等)的影响,如稻蟹共作对土壤质量^[3-4]、微生物群落^[5-6]、水质及化学元素^[7-9]、河蟹生长及适应性^[10]、底栖动植物^[11]、水稻产量^[12]及温室气体^[13]等方面的研究,而针对稻田节肢类天敌动物的研究较少。

蜘蛛是农田系统中重要的节肢类天敌,在种群数量和控制害虫功能方面地位突出,为农田生态系统提供了重要的控害服务功能^[14-16]。蜘蛛对环境变化响应非常敏感,蜘蛛群落的生态位变化、多样性特点、群落功能等是反映生态服务变化的重要指标^[17-18],有关稻田蜘蛛生态位的研究主要涉及天敌与害虫生态位联结关系^[19-20]、杀虫剂的影响^[16,21]、稻鸭共作系统^[22-23]等,鲜有稻蟹共作系统蜘蛛生态位报道。

生态位原理与方法是探讨竞争共存机制、协同进化、群落演替等生态特征的重要途径^[22],目前已广泛应用于农田蜘蛛生态位的研究。例如,徐悦等人采用生态位分析法研究了合肥不同茶园中广翅蜡蝉与蜘蛛空间、数量和时间的关系^[24];丛胜波等人分析了黄秋葵田主要害虫、天敌种群动态及时间生态位^[25];秦钟等人研究了稻鸭共作系统稻飞虱及捕食性天敌类群之间的关系^[26]。本文以辽河流域盘锦常规稻田(下称常规田)和稻蟹共作田(下称稻蟹田)中的蜘蛛为研究对象,调查了两处理稻田主要蜘蛛群落组成情况,利用生态位原理与方法,系统地分析了主要蜘蛛生态位宽度、重叠和相似性特点,为科学地利用蜘蛛资源的控害功能提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

本试验于2022年在辽宁省盐碱地利用研究所试验基地完成($122^{\circ}11'19.712''E$, $41^{\circ}2'33.886''N$),该地区位于辽河下游腹地,四季分明,雨热同期,试验地土壤为多年耕作的水稻土,单季稻区。稻瘟病、纹枯病、稻飞虱、二化螟、蚜虫、稻水象甲、稗草、扁秆蔗草等为本地区稻田主要病虫害。

试验稻田共 2 个处理(常规田和稻蟹田)。稻蟹田选择多年饲养河蟹的田块,埝埂种植大豆,河蟹品种为中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*),6月1日投入扣蟹苗,密度约 9000 只/hm²(8—10 g/只),9月20日开始收蟹,持续 3 天,河蟹饲料正常投放。两处理田均在 5 月初施入底肥(复合肥 N:P:K=28:18:8),水稻移栽后不再施肥。除草剂:防治稗草均在 5 月 15 日施入丁草胺和吡嘧磺隆,后期若杂草(禾本科、莎草科)发生重,常规田施入五氟磺草胺,稻蟹田需人工除草。杀菌剂均正常使用:防治水稻纹枯病在 6 月下旬施井冈霉素,防治稻瘟病在 7 月 28 日和 8 月 8 日各施 1 次吡唑醚菌酯。杀虫剂仅在常规田施用:6 月初施入噻虫嗪防治潜叶蝇和稻水象甲,6 月底施入三唑磷防治 1 代二化螟,7 月上中旬施入吡蚜酮防治稻飞虱,7 月下旬施入氯虫苯甲酰胺防治 2 代二化螟,9 月初视蚜虫和稻飞虱发生量施入噻虫嗪等。水稻品种为‘盐丰 47’,机插秧移栽(3—5 株/穴),5 月 20 日插秧,10 月 15 日收割,常规田与稻蟹田面积均为 1000 m²。

1.2 取样方法

调查从 6 月至 10 月,每月 10、20、30 日各查 1 次,全年共 13 次。调查时在垂直方向将稻株划分为上、中、下部 3 个层次(上部:稻叶顶端及周边冠层,抽穗后稻穗计为上部,若有蛛网落在 2 株之间的,一律计入该稻株上部。下部:6 月稻株矮小以水面向上 5cm 为界,7 月起以 10cm 为界。其余均为中部)。采用直接观察法调查蜘蛛:轻轻拨开附近稻株,从上部冠层开始,其次为中部,最后统计基部及水面附近处。常规田和稻蟹田各调查 5 点,每点调查连续的 3 穴水稻,统计 3 穴稻株上、中、下部蜘蛛种类及数量。

1.3 蜘蛛种类鉴定

在田间直接记录蜘蛛各种类及相应的数量,对少数未能鉴定者,编号后用 5mL 冷冻管采集带回室内鉴定。物种鉴定主要参考《中国蜘蛛生态大图鉴》《辽宁省农田蜘蛛识别与利用》《水稻害虫天敌图说》《中国生物物种名录》(第二卷 I 蜘蛛纲)等。蜘蛛鉴定到种,若蛛、亚成蛛与成蛛均计入数量。

1.4 数据分析

生态位宽度值表示物种在时间和空间维度上对资源的利用情况,反映系统中某物种出现时间的长短,空间分布的范围和生物量^[27],生态位重叠和相似性比例指数揭示了物种间对资源利用的相似性程度,相似性比例越大,表明利用资源的相似程度越高^[28],时空二维生态位全面地描述物种间的竞争共存关系^[29]。本研究以 13 次调查为时间资源序列,以稻株上、中、下 3 个层次为空间资源序列,蜘蛛按种鉴定,按科统计分析。

(1) 蜘蛛群落组成采用 IBM SPSS statistics 26.0 进行 t 检验分析。

(2) 生态位宽度采用 Levins^[30]的公式计算:
$$B_i = \frac{1}{S \sum_{i=1}^n (P_i)^2}$$

式中, B_i 为物种 i 的生态位宽度, S 为每个资源序列的总单元数, P_i 为某物种利用第 i 个资源序列占总资源的比例, n 为物种数。

(2) 生态位重叠采用 Pianka^[31]的公式计算:
$$Q_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ik} P_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n P_{ik}^2 \sum_{i=1}^n P_{ij}^2}}$$

式中, Q_{kj} 为物种 k 对物种 j 的生态位重叠指数, P_{ik} 和 P_{ij} 是物种 k 和物种 j 对第 i 个资源的利用占总资源的比例, n 为物种数。

(4) 生态位相似性比例采用 Morisita^[32]的公式计算:

$$C_{kj} = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_{ik} P_{ij}}{\sum_{i=1}^n P_{ik} [(n_{ik} - 1) / (N_k - 1)] + \sum_{i=1}^n P_{ij} [(n_{ij} - 1) / (N_j - 1)]}$$

式中, C_{kj} 为物种 k 对物种 j 的生态位相似性比例指数, P_{ik} 和 P_{ij} 是物种 k 和物种 j 对第 i 个资源的利用占总资源的比例, n_{ik} 和 n_{ij} 是物种 k 和物种 j 在第 i 资源序列等级上的数量, N_k 和 N_j 分别表示物种 k 和物种 j 的个体数量之和。

(5) 时空二维生态位宽度及重叠指数采用 Cody^[33]和 May^[34]计算方法:

时空生态位宽度(重叠/相似性) = 时间生态位宽度(重叠/相似性) × 空间生态位宽度(重叠/相似性)。

2 结果与分析

2.1 主要蜘蛛群落组成

对常规田和稻蟹田的蜘蛛种类与数量进行调查,共查到蜘蛛个体 892 头,隶属于 10 科,共 30 种,其中稻蟹田蜘蛛占比 57.96%,略多于常规田。以平均每个调查点蜘蛛数量分析,常规田中狼蛛(18.60±1.17)头最多,显著高于其他种类($P \leq 0.05$);其次为肖蛸(13.00±1.14)头和皿蛛(11.80±0.97)头,其数量显著高于其余 7 科,但两者间无显著差异($P \leq 0.05$);管巢蛛、园蛛、球腹蛛和蟹蛛数量为 5.6—6.4 头,其相互间没有显著差异($P \leq 0.05$);数量最少的为逍遥蛛(1.00±0.32)头和漏斗蛛(0.20±0.20)头。稻蟹田亦为狼蛛(26.00±2.39)头最多,显著高于其他种类($P \leq 0.05$);其次为肖蛸(17.80±1.66)头和皿蛛(14.80±1.28)头,两者间无显著差异($P \leq 0.05$);园蛛数量(11.40±1.50)头与皿蛛没有显著差异,但显著低于狼蛛和肖蛸($P \leq 0.05$);管巢蛛、球腹蛛、蟹蛛和跳蛛数量为 5.6—8.6 头,其相互间没有显著差异($P \leq 0.05$);数量最少的为逍遥蛛(0.80±0.37)头,未查到漏斗蛛。可见,狼蛛、皿蛛、肖蛸在两处理田中数量均居前列;园蛛科在稻蟹田为(11.40±1.50)头,而在常规田仅为(6.40±0.75)头;逍遥蛛和漏斗蛛数量均较少,故生态位分析时不评价这两种蜘蛛(表 1)。

表 1 常规田与稻蟹田主要蜘蛛种类与数量

Table 1 Species and quantity of spiders in conventional rice field and rice-crab co-culture (RC) field

蜘蛛科目 Spider family	常规田 Conventional rice field			稻蟹田 Rice-crab co-culture field		
	个体数 Individual number	物种数 Species number	主要种类 Main species	个体数 Individual number	物种数 Species number	主要种类 Main species
狼蛛科 Lycosidae	18.60±1.17a	5	拟水狼蛛 <i>Pirata subpiraticus</i> 、拟环纹豹蛛 <i>Pardosa pseudoannulata</i>	26.00±2.39A	5	拟水狼蛛、拟环纹豹蛛
皿蛛科 Linyphiidae	11.80±0.97b	4	草间钻头蛛 <i>Hylyphantes graminicola</i>	14.80±1.28BC	4	草间钻头蛛
管巢蛛科 Clubionidae	6.40±1.12c	2	棕管巢蛛 <i>Clubiona japonicola</i>	8.40±0.68DE	2	棕管巢蛛
园蛛科 Araneidae	6.40±0.75c	5	黑斑亮腹蛛 <i>Singahamata</i> 、角类肥蛛 <i>Larinioides cornuta</i>	11.40±1.50CD	5	四点高亮腹蛛 <i>Hypsosinga pygmaea</i> 、角类肥蛛、黑斑亮腹蛛
肖蛸科 Tetragnathidae	13.00±1.14b	5	四斑锯螯蛛 <i>Dyschiriognatha quadrimaculata</i> 、圆尾肖蛸 <i>Tetragnatha shikokiana</i>	17.80±1.66B	5	四斑锯螯蛛、圆尾肖蛸
球腹蛛科 Theridiidae	6.00±1.27cd	1	八斑球腹蛛 <i>Theridion octomaculatum</i>	6.80±0.66E	1	八斑球腹蛛
蟹蛛科 Thomisidae	5.60±1.17cd	2	三突花蛛 <i>Misumenops tricuspoidatus</i>	8.60±1.03DE	2	三突花蛛
跳蛛科 Salticidae	3.40±0.51de	4	纵条蝇狮 <i>Marpissa magister</i>	5.60±0.60E	4	纵条蝇狮
漏斗蛛科 Agelenidae	0.20±0.20f	1	机敏异漏蛛 <i>Aelena difficilis</i>	0.00±0.00F	0	机敏异漏蛛
逍遥蛛科 Philodromidae	1.00±0.32f	1	刺跗逍遥蛛 <i>Philodromus spinitarsis</i>	0.80±0.37F	1	刺跗逍遥蛛
<i>t</i>				-2		
<i>df</i>				98		
<i>P</i>				0.048		

表中数据为平均值±标准误,同一列数据后不同字母者表示经 *t* 检验具显著差异($P \leq 0.05$)

2.2 主要蜘蛛群落生态位

常规田中,时间生态位宽度最大的为管巢蛛(0.7877),在 13 个时间资源序列中均有分布,其中 6 个序列占比为 9.38%—15.63%,其他序列占比为 3.13%—6.25%,可见,管巢蛛在全部时间资源序列中分布比例较为均匀;宽度值最小的为跳蛛(0.5700),其仅利用 9 个时间序列,其中 4 个占比仅为 5.90%,具有明显的发生高峰期(表 2)。空间生态位宽度最大的为园蛛(0.7235)和肖蛸(0.7226),两者指数相似,说明它们在水稻植株上分布较为均匀,两者上、下部合计分别占 48.88%和 47.70%,其余分布在稻株中部;宽度值最小的也是跳蛛(0.3748),其在稻株上部占比为 5.80%,其余全在中部,显示了其局部分布的特点(表 3)。

表 2 常规田主要蜘蛛时间生态位宽度和重叠指数

Table 2 Temporal niche breadth and overlap index of main spiders in conventional rice field

蜘蛛类别 Categories of spider	狼蛛科 Lycosidae	皿蛛科 Linyphiidae	管巢蛛科 Clubionidae	园蛛科 Araneidae	肖蛸科 Tetragnathidae	球腹蛛科 Theridiidae	蟹蛛科 Thomisidae	跳蛛科 Salticidae
狼蛛科 Lycosidae	0.7303 *	0.8627	0.8714	0.8818	0.8958	0.7261	0.8304	0.9231
皿蛛科 Linyphiidae	0.9675	0.6391 *	0.8989	0.8398	0.9289	0.8602	0.8667	0.7119
管巢蛛科 Clubionidae	1.0767	1.1218	0.7877 *	0.8761	0.9165	0.7867	0.8870	0.7046
园蛛科 Araneidae	1.0219	0.9898	1.1425	0.6862 *	0.9624	0.7646	0.842	0.7865
肖蛸科 Tetragnathidae	1.0030	1.0598	1.1467	1.1330	0.6757 *	0.8584	0.9077	0.7885
球腹蛛科 Theridiidae	0.8729	1.0529	1.0600	0.9668	1.0489	0.6073 *	0.8694	0.6749
蟹蛛科 Thomisidae	1.0204	1.0817	1.2317	1.0894	1.1323	1.1655	0.6416 *	0.7928
跳蛛科 Salticidae	1.2472	0.9751	1.0825	1.1196	1.0807	0.9946	1.1992	0.5700 *

主对角线(*)为生态位宽度指数,对角线以上为生态位重叠指数,对角线以下为生态位相似性比例指数

表 3 常规田主要蜘蛛空间生态位宽度和重叠指数

Table 3 Spatial niche breadth and overlap index of main spiders in conventional rice field

蜘蛛类别 Categories of spider	狼蛛科 Lycosidae	皿蛛科 Linyphiidae	管巢蛛科 Clubionidae	园蛛科 Araneidae	肖蛸科 Tetragnathidae	球腹蛛科 Theridiidae	蟹蛛科 Thomisidae	跳蛛科 Salticidae
狼蛛科 Lycosidae	0.5252 *	0.4906	0.2611	0.2718	0.2770	0.9560	0.1911	0.2324
皿蛛科 Linyphiidae	0.4943	0.6003 *	0.8524	0.8117	0.8264	0.7148	0.7116	0.9605
管巢蛛科 Clubionidae	0.2636	0.8708	0.6910 *	0.9957	0.9977	0.4447	0.9724	0.8448
园蛛科 Araneidae	0.2723	0.8243	1.0270	0.7235 *	0.9996	0.4339	0.988	0.7924
肖蛸科 Tetragnathidae	0.2766	0.8361	1.0248	1.0226	0.7226 *	0.4447	0.9837	0.8082
球腹蛛科 Theridiidae	0.9691	0.7306	0.4588	0.4454	0.4546	0.6224 *	0.3281	0.5001
蟹蛛科 Thomisidae	0.1936	0.7287	1.0081	1.0195	1.0109	0.3392	0.6633 *	0.7008
跳蛛科 Salticidae	0.2308	0.9440	0.8209	0.7622	0.7754	0.4923	0.6857	0.3748 *

综合分析,狼蛛的时间生态位较大而空间生态位较小,说明狼蛛在水稻生育期内出现的时间长,在稻株上以局部分布为主,实际上,狼蛛中分布在稻株上部的仅有携带卵袋及负幼行为阶段的拟环纹豹蛛,而数量较多的拟水狼蛛则几乎全部生活在水稻基部,因而狼蛛空间生态位宽度值相对较小。皿蛛、管巢蛛、园蛛、肖蛸、球腹蛛和蟹蛛的时间和空间生态位宽度值均高于 0.6000,说明它们不仅发生期长,同时在水稻全株分布。跳蛛时间和空间生态位宽度值均较小,说明跳蛛有明显的发生高峰期,且局部分布。

稻蟹田中,时间生态位宽度最大的为狼蛛(0.8270),其在 8 月 10 日至 9 月 10 日这 4 个序列占比为 10.77%—13.85%,其他序列占比为 3.08%—9.23%,皿蛛(0.7801)和管巢蛛(0.7798)的宽度值也较高,可见它们都利用了较多的时间资源序列,在水稻生育期出现的时间都比较长;宽度值最小的为球腹蛛(0.5850),其仅利用 10 个时间序列,其中 4 个序列占比不高于 5.90%,全年种群数量波动较大,有多个峰值出现(表 4)。空间生态位宽度最大的为肖蛸(0.7927),其在水稻植株上分布相对均匀,上部和下部总计占比 49.40%,其余 50.60%分布在中部;宽度值最小的仍为跳蛛(0.3854),其 93%分布在中部,显示其局限分布的特点(表 5)。

综合分析,狼蛛、管巢蛛、跳蛛的时间生态位宽度较大而空间生态位宽度较小,它们发生期长,但在稻株局部分布,集中性更强,而肖蛸、球腹蛛、蟹蛛的空间生态位宽度较大而时间生态位宽度较小,说明它们在稻株上分布相对均匀,但有明显的发生高峰期。

表 4 稻蟹田主要蜘蛛时间生态位宽度和重叠指数

Table 4 Temporal niche breadth and overlap index of main spiders in RC field

蜘蛛类别 Categories of spider	狼蛛科 Lycosidae	皿蛛科 Linyphiidae	管巢蛛科 Clubionidae	园蛛科 Araneidae	肖蛸科 Tetragnathidae	球腹蛛科 Theridiidae	蟹蛛科 Thomisidae	跳蛛科 Salticidae
狼蛛科 Lycosidae	0.8270 *	0.954	0.935	0.9221	0.8788	0.8163	0.8496	0.947
皿蛛科 Linyphiidae	1.0609	0.7801 *	0.9657	0.936	0.8358	0.904	0.9259	0.9552
管巢蛛科 Clubionidae	1.1013	1.1691	0.7798 *	0.9249	0.8547	0.8363	0.9327	0.9042
园蛛科 Araneidae	1.0197	1.0642	1.1111	0.7255 *	0.8568	0.8804	0.9134	0.9292
肖蛸科 Tetragnathidae	1.0094	0.9869	1.064	1.0096	0.619 *	0.6667	0.694	0.8595
球腹蛛科 Theridiidae	0.9445	1.0755	1.0476	1.0459	0.8258	0.585 *	0.8912	0.9136
蟹蛛科 Thomisidae	0.9637	1.0797	1.1457	1.0635	0.8423	1.0917	0.6157 *	0.8646
跳蛛科 Salticidae	1.1868	1.2303	1.2403	1.1858	1.1351	1.2134	1.1262	0.7355 *

表 5 稻蟹田主要蜘蛛空间生态位宽度和重叠指数

Table 5 Spatial niche breadth and overlap index of main spiders in RC field

蜘蛛类别 Categories of spider	狼蛛科 Lycosidae	皿蛛科 Linyphiidae	管巢蛛科 Clubionidae	园蛛科 Araneidae	肖蛸科 Tetragnathidae	球腹蛛科 Theridiidae	蟹蛛科 Thomisidae	跳蛛科 Salticidae
狼蛛科 Lycosidae	0.6941 *	0.7737	0.5284	0.5854	0.5874	0.9967	0.4941	0.567
皿蛛科 Linyphiidae	0.783	0.7255 *	0.9467	0.9349	0.9099	0.7872	0.8873	0.9372
管巢蛛科 Clubionidae	0.5293	0.9482	0.5231 *	0.9585	0.9251	0.5474	0.942	0.9645
园蛛科 Araneidae	0.5926	0.9506	0.9586	0.7423 *	0.9949	0.5811	0.9929	0.862
肖蛸科 Tetragnathidae	0.5931	0.9236	0.9189	1.0109	0.7927 *	0.5749	0.9923	0.8078
球腹蛛科 Theridiidae	1.0151	0.8041	0.5556	0.5935	0.5852	0.6465 *	0.4858	0.6041
蟹蛛科 Thomisidae	0.5025	0.9057	0.9514	1.0136	1.0105	0.499	0.6841 *	0.8227
跳蛛科 Salticidae	0.547	0.9006	0.9623	0.8257	0.7649	0.5929	0.8002	0.3854 *

稻蟹共作使稻田蜘蛛生态位宽度发生不同程度的改变。稻蟹田中狼蛛、皿蛛、跳蛛的时间生态位宽度增加,狼蛛在 9 个时间序列中的占比增加,皿蛛和跳蛛利用时间序列的个数增加,使得它们时间生态位宽度值增加。肖蛸的时间生态位宽度值降低,虽然其在两处理稻田中均利用 10 个序列,但最后两个序列肖蛸的占比常规田为 21.50%,稻蟹田仅为 5.10%。稻蟹田狼蛛、皿蛛、肖蛸的空间生态位宽度增加,狼蛛在稻株中上部的占比由 22.58% 增加至 41.54%,皿蛛在稻株上部的占比由 8.40% 增加至 16.20%,同样,肖蛸主要在稻株中上部活动,而稻蟹共作使其在稻株下部的占比由 4.60% 增加至 10.10%,可见稻蟹田中狼蛛、皿蛛、肖蛸在水稻全株分布更加均匀。管巢蛛空间生态位宽度降低,常规田中其在水稻全株分布,而稻蟹共作使管巢蛛全部分布在稻株中上部。

2.3 主要蜘蛛群落生态位重叠与相似性

从时间维度分析,常规田中,跳蛛与狼蛛,肖蛸与园蛛、管巢蛛生态位重叠和相似性比例指数均较高,如肖蛸与园蛛生态位重叠指数为 0.9624,相似性比例指数高达 1.133,说明两者在充分利用多个时间资源序列的前提下出现的比例较一致,实际上,两者均利用了 10 个序列,在 7 月 30 日、8 月 20 日、8 月 30 日这 3 个时间,两者占比均在 12.31%—13.85%,这说明肖蛸与园蛛在共有资源内的竞争性较强。球腹蛛与狼蛛生态位重叠和相似性比例指数均较低,两者生态位重叠指数为 0.7261,相似性比例指数为 0.8729,狼蛛利用全部时间序列,其中前 2 个序列,球腹蛛并未出现,而 9 月 30 日球腹蛛出现比例值高达 20.00%,此时狼蛛出现的比例仅为 7.50%,两者错峰发生,即利用不同的时间资源或者相同时间内占比差异较大,说明它们在共有时间资源内竞

争不大(表 2)。

稻蟹田中,跳蛛与狼蛛、皿蛛,皿蛛与管巢蛛的生态位重叠和相似性比例指数均较高,以跳蛛与狼蛛为例,其生态位重叠指数为 0.9470,相似性比例指数为 1.1868,这是因为跳蛛和狼蛛共同出现的时间序列有 11 个,其中有 5 个序列的占比差值低于 1.00%,即它们以相近的比例值出现在共有时间序列中,这也说明两者竞争性较强。肖蛸与球腹蛛、蟹蛛生态位重叠和相似性比例指数均较低,如肖蛸有 2 个序列占比高于 15.00%,分别是 7 月 20 日(15.38%)和 8 月 30 日(17.95%),而球腹蛛占比高于 15%时出现在 9 月 30 日和 10 月 10 日,蟹蛛出现在 9 月 10 日和 9 月 30 日,可见三者发生高峰期不尽相同,因而指数较低(表 4)。

从空间维度分析,常规田中,生态位重叠和相似性比例指数均较高的为管巢蛛、园蛛、肖蛸三者间,它们在稻株上分布的比例较为一致,例如管巢蛛 56.30%分布在中部,而园蛛、肖蛸比例分别为 51.10%、52.30%,管巢蛛分布在上部比例为 40.60%,而园蛛、肖蛸分别为 44.40%、43.10%,可见它们在稻株上分布的一致性较高,竞争性也较强。与之相反,狼蛛与管巢蛛、园蛛、肖蛸、蟹蛛、跳蛛的生态位重叠和相似性比例指数均较低,主要是因为狼蛛科除了拟环纹豹蛛在水稻全株上下活动,其他 4 种狼蛛主要在水稻基部及水面处活动,这与生活在中、上部的蜘蛛(管巢蛛、园蛛等)相遇的几率较小,因此它们的生态位重叠和相似性比例指数均较低,竞争较弱(表 3)。

稻蟹田中,生态位重叠和相似性比例指数均较高的为狼蛛与球腹蛛,园蛛与肖蛸、蟹蛛,以及肖蛸与蟹蛛,例如,狼蛛 95.38%分布在中下部,球腹蛛 100.00%在中下部,同样,园蛛与肖蛸、蟹蛛在中上部占比分别为 91.80%、89.90%、97.70%,说明在共有空间资源内它们相互的竞争性较强。与之相反,狼蛛与管巢蛛、蟹蛛,蟹蛛与球腹蛛生态位重叠和相似性比例指数均较低,如狼蛛与蟹蛛生态位重叠指数为 0.4941,相似性比例指数为 0.5025,这是因为狼蛛在稻株下部占比为 58.46%,蟹蛛仅为 2.30%,狼蛛在稻株上部占比为 4.62%,而蟹蛛则占 41.90%,可见,两者虽同为游猎型蜘蛛,但利用空间却有较大差异,竞争性也较小(表 5)。

2.4 主要蜘蛛群落时间-空间二维生态位

常规田时空二维生态位宽度居前的依次为管巢蛛(0.5443) > 园蛛(0.4965) > 肖蛸(0.4883) > 蟹蛛(0.4212),跳蛛指数最低,为 0.2136(表 6);稻蟹田依次为狼蛛(0.5740) > 皿蛛(0.5659) > 园蛛(0.5386) > 肖蛸(0.4907) > 蟹蛛(0.4212) > 管巢蛛(0.4080),指数最低的仍为跳蛛(0.2835)(表 7)。可见,园蛛、肖蛸、蟹蛛在两处理稻田中时空生态位宽度均较高,它们利用了较多的时间、空间资源序列,充分发挥控制水稻害虫的能力。稻蟹共作使狼蛛、皿蛛二维生态位宽度值增加,指数增幅分别为 49.64%和 47.49%,管巢蛛指数下降,降幅为 25.04%,可见,狼蛛、皿蛛、管巢蛛的时空二维生态位宽度均因稻蟹共作技术而发生不同程度的改变;其他蜘蛛在两处理稻田中指数差异不大,甚至相同(球腹蛛 0.3782),表明它们的时空二维生态位受稻蟹共作技术影响较小。

表 6 常规田主要蜘蛛时间-空间二维生态位宽度和重叠指数

Table 6 Temporal-spatial niche breadth and overlap index of main spiders in conventional rice field

蜘蛛类别 Categories of spider	狼蛛科 Lycosidae	皿蛛科 Linyphiidae	管巢蛛科 Clubionidae	园蛛科 Araneidae	肖蛸科 Tetragnathidae	球腹蛛科 Theridiidae	蟹蛛科 Thomisidae	跳蛛科 Salticidae
狼蛛科 Lycosidae	0.3836 *	0.4232	0.2275	0.2396	0.2481	0.6942	0.1587	0.2145
皿蛛科 Linyphiidae	0.4783	0.3837 *	0.7663	0.6816	0.7676	0.6149	0.6167	0.6838
管巢蛛科 Clubionidae	0.2838	0.9768	0.5443 *	0.8724	0.9144	0.3499	0.8625	0.5952
园蛛科 Araneidae	0.2783	0.8159	1.1733	0.4965 *	0.9620	0.3318	0.8319	0.6232
肖蛸科 Tetragnathidae	0.2775	0.8861	1.1751	1.1586	0.4883 *	0.3817	0.8928	0.6373
球腹蛛科 Theridiidae	0.9587	0.8648	0.5821	0.6207	0.4833	0.3782 *	0.4330	0.5519
蟹蛛科 Thomisidae	0.4842	0.9779	1.0901	1.0780	0.8511	0.5447	0.4212 *	0.7113
跳蛛科 Salticidae	0.2878	0.9205	0.8886	0.8534	0.8379	0.4897	0.8223	0.2136 *

分析蜘蛛的时空二维生态位重叠和相似性比例指数,在常规田中,两指数均较高的是管巢蛛、肖蛸、园蛛三者间,如管巢蛛与肖蛸重叠指数为 0.9144,相似性比例指数为 1.1751,说明两者均以较大占比共同利用较多

的时空资源。狼蛛与管巢蛛、园蛛、肖蛸、跳蛛的重叠和相似性比例指数均较低,在 0.2145—0.2878 之间,这主要是因为狼蛛空间生态位宽度较小(表 6)。在稻蟹田中,两指数均较高的是皿蛛、管巢蛛、跳蛛三者间,以皿蛛与管巢蛛为例,两者重叠指数为 0.9142,相似性比例指数为 1.1086,说明两者对共同资源利用程度相似,竞争性也强,而两指数均较低的是狼蛛与蟹蛛,球腹蛛与肖蛸、蟹蛛(表 7)。

表 7 稻蟹田主要蜘蛛时间-空间二维生态位宽度和重叠指数

Table 7 Temporal-spatial niche breadth and overlap index of main spiders in RC field

蜘蛛类别 Categories of spider	狼蛛科 Lycosidae	皿蛛科 Linyphiidae	管巢蛛科 Clubionidae	园蛛科 Araneidae	肖蛸科 Tetragnathidae	球腹蛛科 Theridiidae	蟹蛛科 Thomisidae	跳蛛科 Salticidae
狼蛛科 Lycosidae	0.5740 *	0.7381	0.4941	0.5398	0.5162	0.8135	0.4198	0.5369
皿蛛科 Linyphiidae	0.8307	0.5659 *	0.9142	0.8751	0.7604	0.7117	0.8215	0.8952
管巢蛛科 Clubionidae	0.5829	1.1086	0.4080 *	0.8865	0.7907	0.4577	0.8787	0.8721
园蛛科 Araneidae	0.6043	1.0116	1.0650	0.5386 *	0.8525	0.5116	0.9070	0.8010
肖蛸科 Tetragnathidae	0.5986	0.9116	0.9777	1.0207	0.4907 *	0.3833	0.6886	0.6943
球腹蛛科 Theridiidae	0.9587	0.8648	0.5821	0.6207	0.4833	0.3782 *	0.4330	0.5519
蟹蛛科 Thomisidae	0.4842	0.9779	1.0901	1.0780	0.8511	0.5447	0.4212 *	0.7113
跳蛛科 Salticidae	0.6491	1.1081	1.1935	0.9791	0.8683	0.7194	0.9011	0.2835 *

可以看出,稻蟹共作使少数蜘蛛的时空二维生态位重叠和相似性比例指数下降;肖蛸与蟹蛛、皿蛛仅重叠指数下降,园蛛与管巢蛛仅相似性比例指数下降,而肖蛸与园蛛、管巢蛛两指数均下降。稻蟹共作使多数蜘蛛的时空二维生态位重叠和相似性比例指数增大或持平,当比例值增大时,说明物种对利用环境资源的竞争也越强,对害虫的竞争和控制也增强,控虫效果也更显著。

3 讨论

3.1 稻蟹共作对蜘蛛生态位的影响

稻蟹共作仅有近 30 年的发展历史^[35],更鲜有稻蟹共作系统蜘蛛生态位的研究,蜘蛛作为稻田优势天敌,其分布格局与数量结构的变化对发挥其控害功能至关重要^[16]。秦钟等^[22]研究了稻鸭共作系统中捕食性天敌生态位,认为微蛛、园蛛、狼蛛和肖蛸是捕食性天敌优势类群,这与本研究稻蟹共作系统狼蛛、皿蛛、肖蛸数量居前的结果一致,但该研究中稻鸭区天敌总个体数较常规区下降,且稻鸭共作使微蛛与园蛛的时空二维生态位宽度值下降,这与本研究稻蟹田蜘蛛总个体数略多于常规田且稻蟹共作使皿蛛、园蛛的时空生态位宽度值上升的结果相反,推测这可能由于鸭子能直接取食蜘蛛,而河蟹取食蜘蛛现象鲜有报道,总之,稻田复合生态系统能改变天敌生存环境,从而直接或间接地影响蜘蛛生态位。

稻蟹共作使狼蛛、皿蛛时空生态位宽度显著增加,实际上狼蛛、皿蛛分别包含了 5 种和 4 种蜘蛛,不同种类对稻蟹共作响应程度不同,其中主要蜘蛛能直接影响蜘蛛生态位在科水平上的变化,以拟水狼蛛和草间钻头蛛为例,两者在稻蟹田均多利用 1 个时间序列,使各序列中的占比更加均匀,同时,受河蟹活动影响,部分蜘蛛从水稻基部被迫向上迁移从而扩大了分布空间,因而,在时间、空间维度上,拟水狼蛛和草间钻头蛛生态位宽度增加,促进了狼蛛、皿蛛的时空二维生态位宽度指数增加。

3.2 稻蟹共作影响蜘蛛生态位的机理

稻蟹共作系统投入河蟹,以及因河蟹养殖而限用药剂、水深增加、投喂饲料、人工除草等,都可能直接或间接地改变蜘蛛生态位。河蟹游走、攀爬稻株、机械碰撞等行为,一方面直接改变蜘蛛分布位置、影响其与同类竞争的程度。例如,河蟹活动促使狼蛛从稻株基部向中部迁移,使其与皿蛛、球腹蛛等在中部活动的蜘蛛相遇的几率增加,增强它们对害虫的捕食竞争,河蟹也促使管巢蛛与其他游猎型(狼蛛、蟹蛛、跳蛛)或结小网型(皿蛛)蜘蛛的竞争,但河蟹很少攀爬至水稻上部,因而管巢蛛对结大型圆网的肖蛸和园蛛竞争反而减弱。另一方面,河蟹通过影响害虫而间接地影响蜘蛛。蜘蛛对目标害虫具有跟随现象,害虫生态位宽度能影响蜘蛛

生态位宽度^[36],河蟹能直接取食稻飞虱低龄若虫、河蟹攀爬能干扰灰飞虱等害虫的栖息位置,引导蜘蛛向害虫聚集部位迁移,即河蟹影响稻飞虱等害虫的分布格局从而影响蜘蛛生态位。另外,稻蟹共作由于限用杀虫剂,害虫数量上升,天敌蜘蛛也跟随害虫迁移,例如,水稻成熟期稻穗上灰飞虱若虫及各虫态的蚜虫较常规田显著增多,与之相应的三突花蛛、棕管巢蛛等数量也显著增多,这些蜘蛛扩大了分布空间或在特定空间占比增加,说明杀虫剂限用能改变蜘蛛分布格局,从而间接影响蜘蛛生态位特征。

3.3 存在问题

稻蟹共作系统是一个复杂的立体生态系统,蜘蛛生态位特征受多种因素共同影响。本研究从时间维度上定义全年调查次数为时间资源序列,实际上蜘蛛在单日内空间生态位也有差异^[24],本试验调查均在上午进行,未讨论蜘蛛生态位日变化情况;王智等研究报道,低剂量农药能显著增加天敌对害虫的捕食量^[21],本文未讨论常规田农药剂量对蜘蛛捕食特征的影响;蜘蛛的捕食行为也受植株高度、盖度影响^[37],本研究在前期调查时稻株矮小,而后期水稻株高增加,稻叶茂盛,这两个时期调查对结网型蜘蛛的捕食行为影响差异较大;蜘蛛取食对象包含害虫(稻飞虱、蚜虫等)及其他中性昆虫(如蚊蝇等)^[38],甚至种内(拟环纹豹蛛的亲子相杀现象等)和种间(如拟水狼蛛捕食八斑球腹蛛等)也存在互残现象。因此,在后续研究中应考虑这类因素的影响,以更好地评判天敌对害虫的捕食能力。

4 结论

本文以生态位理论为基础,分析了常规田和稻蟹田主要蜘蛛群落组成和生态位特征。狼蛛、皿蛛、肖蛸数量在两处理田中均居前列,稻蟹田较常规田蜘蛛总数量多 15.92%。稻蟹共作使蜘蛛数量、分布格局、生态位及重叠指数发生了改变,狼蛛、皿蛛的时空生态位宽度增加,管巢蛛的时空生态位宽度降低;稻蟹田多数蜘蛛时空二维生态位重叠和相似性比例指数均表现为增大或持平。总之,稻蟹共作不仅使蜘蛛数量增加,也促使蜘蛛利用时间、空间资源的程度发生改变,使其利用较多的资源等级,分布更均匀,发生时间长,促进蜘蛛更好地发挥控害作用。

参考文献 (References):

- [1] 王武,王成辉,马旭洲. 河蟹生态养殖. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [2] 苗微,刘佳敏,张佳,唐亮,张文忠,徐正进. 稻蟹共作对田间生态环境与水稻生长的影响研究进展. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2785-2791.
- [3] 佟德利,郑晗,牟奕儒,夏语擎,刘天娇,贺海升. 稻蟹共作对水稻土性质的影响. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2021, 39(4): 380-384.
- [4] 汪清,王武,马旭洲,陈再忠,于永清. 稻蟹共作对土壤理化性质的影响. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3948-3952.
- [5] 宋宇,王鹏,韦月平. 基于宏基因组测序的稻蟹共作稻田根际土壤微生物群落功能分析. 西北农业学报, 2023, 32(9): 1466-1475.
- [6] 许忠伟,刘春月,石佳悦,邵霞,宋宇. 稻蟹共作田不同生育期水稻根际土壤细菌群落结构和功能分析. 中国稻米, 2022, 28(4): 61-66.
- [7] 王昂,戴丹超,马旭洲,牟群,于永清,吕为群. 北方稻蟹共作对水体氮素淋溶损失的影响. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2019, 45(3): 332-342.
- [8] 王伟,顾海龙,胡中泽,王显,冯亚明,张培通,焦庆清. 南粳 9108 水稻-中华绒螯蟹共作模式下水体理化指标与生长动态分析. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 109-112.
- [9] 刘崇万,朱晓华,徐志华,任娣,孟勇,刘熠,唐建清. 江苏典型稻虾及稻蟹共作系统中除草剂残留非靶向动态筛查及污染特征. 生态与农村环境学报, 2022, 38(7): 933-943.
- [10] 王世会,赵志刚,罗亮,张瑞,郭坤,徐伟. 黑龙江省稻-扣蟹共作模式中华绒螯蟹生长及水质研究. 水产学杂志, 2022, 35(3): 86-92.
- [11] 李岩,王武,马旭洲,张云杰. 稻蟹共作对稻田水体底栖动物多样性的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 838-843.
- [12] 崔荣阳,刘宏斌,毛昆明,毛妍婷,陈安强,雷宝坤. 洱河流域稻田综合种养对田面水氮素和水稻产量的影响. 中国土壤与肥料, 2020(1): 127-134.
- [13] 王强盛. 稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 633-642.
- [14] 马晓慧,车喜庆,王井士,桑海旭. 稻蟹共作与常规稻田蜘蛛群落组成及多样性分析. 中国生态农业学报: 中英文, 2019, 27(8):

- 1157-1162.
- [15] Landis D A, Wratten S D, Gurr G M. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 2000, 45: 175-201.
- [16] 姜永厚, 吴进才, 徐建祥, 刘井兰, 邱慧敏, 杨国庆, 王洪全. 稻田蜘蛛生态位变化及杀虫剂对捕食功能的影响. *生态学报*, 2002, 22(8): 1286-1292.
- [17] Plath E, Rischen T, Mohr T, Fischer K. Biodiversity in agricultural landscapes: grassy field margins and semi-natural fragments both foster spider diversity and body size. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 316: 107457.
- [18] 王智, 宋大祥, 朱明生. 稻田蜘蛛和害虫的生态位研究. *华南农业大学学报*, 2005, 26(2): 47-51.
- [19] 周浩东, 裴强, 闫香慧, 刘怀, 王泽乐, 刘祥贵, 赵志模. 褐飞虱和白背飞虱与主要天敌时间生态位研究. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 35(5): 80-86.
- [20] 羊绍武, 张晓明, 郭海业, 杜春泽, 全运筹, 傅杨, 陈国华. 多年生水稻田主要害虫、天敌消长规律及时间生态位分析. *应用昆虫学报*, 2019, 56(6): 1370-1381.
- [21] 王智, 宋大祥, 朱明生. 低剂量农药对稻田蜘蛛生态位及控虫效能的影响. *河北大学学报: 自然科学版*, 2006, 26(3): 278-282.
- [22] 秦钟, 章家恩, 张锦, 骆世明. 稻鸭共作系统中主要捕食性天敌的生态位. *中国农业科学*, 2012, 45(1): 67-76.
- [23] 秦钟, 章家恩, 张锦, 骆世明. 稻鸭共作系统中稻飞虱及主要捕食性天敌的空间生态位. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1361-1369.
- [24] 徐悦, 吴筱萌, 程鸿浩, 邹运鼎, 毕守东. 合肥不同茶园广翅蜡蝉与蜘蛛空间、数量和时间关系. *东北农业大学学报*, 2022, 53(8): 25-35.
- [25] 丛胜波, 许冬, 杨妮娜, 王玲, 王金涛, 刘卫国, 杨甜甜, 万鹏. 黄秋葵田主要害虫、天敌种群动态及时间生态位分析. *中国生物防治学报*, 2022, 38(3): 753-759.
- [26] 秦钟, 章家恩, 张锦, 骆世明. 稻鸭共作系统中稻飞虱及主要捕食性天敌类群之间的关系. *中国水稻科学*, 2012, 26(4): 457-466.
- [27] 李德志, 石强, 臧润国, 王绪平, 盛丽娟, 朱志玲, 王长爱. 物种或种群生态位宽度与生态位重叠的计测模型. *林业科学*, 2006, 42(7): 95-103.
- [28] 王自力, 陈勇, 陈晓鸣, 王绍云, 赵杰军. 白蜡虫及其 3 种优势寄生蜂的时空生态位. *生态学报*, 2011, 31(4): 914-922.
- [29] 徐开达, 卢衍尔, 卢占晖, 戴乾. 韭山列岛自然保护区虾类优势种生态位. *生物多样性*, 2018, 26(6): 601-610.
- [30] Levins R. *Evolution in Changing Environments*. San Francisco, California, US: Princeton University Press, 2013.
- [31] 汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 李玲, 徐红梅, 宋亚丽. 鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态. *生态学报*, 2012, 32(20): 6334-6342.
- [32] Abrams P. Some comments on measuring niche overlap. *Ecology*, 1980, 61(1): 44-49.
- [33] Cody M L. *Competition and the structure of bird communities*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1974.
- [34] May R M. Some notes on estimating the competition matrix, A. *Ecology*, 1975, 56(3): 737-741.
- [35] 王昂, 王武, 马旭洲. 稻蟹共作模式的发展历程和前景展望. *吉林农业科学*, 2013, 38(3): 89-92.
- [36] 王智, 曾伯平, 李文健, 王文彬. 稻田蜘蛛优势种和目标害虫的时间生态位研究. *湖南农业科学*, 2002(2): 28-29.
- [37] 沈栋阳. 稻虾模式下田埂植物对稻田节肢动物群落的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [38] 管卫兵, 刘凯, 石伟, 宣富君, 王为东. 稻渔综合种养的科学范式. *生态学报*, 2020, 40(16): 5451-5464.