

景观组成异质性对稻田节肢动物功能群数量和多样性影响的尺度效应



夏志想¹ 李金花¹ 杨泉峰^{2*} 蔡笃程¹ 郑华³

(1. 海南大学热带农林学院, 热带农林生物灾害绿色防控教育部重点实验室, 海口 570228; 2. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 为明确多空间尺度景观组成异质性对稻田不同节肢动物功能群发生的影响, 选择海南省文昌市具有明显景观组成差异梯度的17个早稻田景观, 综合运用稻田节肢动物各功能群调查数据和土地覆被分类数据, 使用线性混合效应模型分析4个空间尺度(0.1、0.25、0.5和1.0 km)下, 稻田、半自然生境(草地、灌丛和撂荒地)、城市、森林面积占比以及景观斑块多样性对植食性害虫、捕食性天敌、寄生性天敌和中性昆虫发生数量和多样性的影响。结果显示: 从发生数量来看, 在较小的空间尺度(0.1 km和0.25 km)下, 捕食性天敌、寄生性天敌和中性昆虫的发生数量随着景观斑块多样性的增加而增加。从多样性来看, 在0.25 km和1.0 km空间尺度下, 中性昆虫多样性随着景观斑块多样性或半自然生境占比的增加而显著增加; 在0.5 km空间尺度下, 寄生性天敌和捕食性天敌的多样性随着半自然生境占比的增加而显著增加。而植食性害虫的发生数量和多样性受各景观组成面积占比或斑块多样性的影响均不明显。表明在海南省文昌市早稻田景观中, 在中小尺度(0.1~0.5 km)下增加景观斑块多样性和半自然生境面积占比有助于保护天敌。

关键词: 景观组成异质性; 空间尺度; 植食性害虫; 捕食性天敌; 寄生性天敌; 中性昆虫

Scale effect of landscape compositional heterogeneity on the abundances and diversity of arthropod functional groups in early paddy fields

Xia Zhixiang¹ Li Jinhua¹ Yang Quanfeng^{2*} Cai Ducheng¹ Zheng Hua³

(1. Key Laboratory of Green Prevention and Control of Tropical Plant Diseases and Pests, Ministry of Education; School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, Hainan Province, China; 2. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: To determine the influence of landscape compositional heterogeneity on the occurrence of different arthropod functional groups in paddy fields at multiple spatial scales, 17 early paddy fields with distinct landscape composition gradients in Wenchang City, Hainan Province were selected. Data on land cover classification and arthropod functional group surveys in paddy fields were combined and analyzed using a linear mixed-effect model to examine the effects of landscape compositional heterogeneity (the area ratio of paddy fields, semi-natural habitats, urban and forest patches, and landscape patch diversity) on the abundance and diversity of herbivores, predators, parasitoids and neutral insects at four spatial scales (0.1, 0.25, 0.5, and 1.0 km). The results showed that at smaller spatial scales (0.1 km and 0.25 km), the abundances of predators, parasitoids and neutral insects increased with higher landscape

patch diversity. At the 0.25 km and 1.0 km spatial scales, neutral insect diversity increased with higher landscape patch diversity or the proportion of semi-natural habitats. At the 0.5 km spatial scale, the diversity of parasitoids and predators increased with a higher proportion of semi-natural habitats. In contrast, the abundance and diversity of herbivores were not significantly affected by any landscape compositional factors. These findings suggest that increasing landscape patch diversity and the proportion of semi-natural habitats at small to medium scales (0.1–0.5 km) can enhance the protection of natural enemies in early paddy field landscapes of Wenchang City, Hainan Province.

Key words: landscape compositional heterogeneity; spatial scale; herbivore; predator; parasitoid; neutral insect

当前,害虫防控严重依赖化学农药,不但使害虫产生了抗药性,而且严重杀伤了害虫天敌、中性昆虫等非靶标生物,同时还造成严重的环境污染(陈学新等,2014;吴孔明,2018)。在自然条件下,天敌能够有效控制大多数害虫(DeBach & Rosen, 1991)。农田景观非作物生境中的森林、草地和撂荒地等半自然生境是害虫天敌的栖息场所,对于天敌的保护具有重要作用(赵紫华等,2013;Gurr et al., 2017)。此外,害虫及其天敌在农田和周围非作物生境中来回转移扩散(Schellhorn et al., 2014; Yang et al., 2021; 2023),由于不同害虫及其天敌的飞行扩散能力、食性等生态学习性存在差异,进而导致农田景观组成对不同害虫及其天敌的发生具有空间尺度效应(Symondson et al., 2002; Jaworski et al., 2022)。因此,明确多空间尺度下农田景观组成异质性对作物害虫及其天敌发生的影响(Zhang et al., 2020),可为选择适宜的空间尺度调节农田景观中的生境组成,从而为保护天敌以控制害虫和降低化学农药使用提供参考。

景观组成异质性会显著影响农田害虫及其天敌的发生和天敌对害虫的控制效果(欧阳芳等,2016; Dominik et al., 2018; Jaworski et al., 2023)。在稻田景观中,林地面积占比低于40%时,二化螟 *Chilo suppressalis* 寄生性天敌的寄生率随着林地面积的增加而降低,林地面积占比高于40%时寄生率却随着林地面积的增加而增加(朱玉麟等,2021);稻飞虱的卵寄生蜂数量与水稻种植面积呈显著正相关(Sann et al., 2018)。在杠果园景观中,景观斑块多样性和森林面积占比的增加会促进入侵害虫橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 的发生,但这种影响具有空间尺度依赖性(Wen et al., 2023)。除森林、作物景观组成和景观斑块多样性影响害虫及其天敌的发生外,景观中半自然生境对某种或某一类害虫天敌具

有较好的保护作用(Holland et al., 2016),且同样具有明显的空间尺度效应。目前,这些研究多关注单一或多空间尺度对农田的某一种或几种害虫或天敌发生的影响,缺乏对节肢动物各功能群总体发生的影响研究,无法全面认识景观组成异质性对各功能群总体发生影响的空间尺度效应,不利于选择适宜的空间尺度进行景观组成优化,从而无法提升对天敌功能群的保护和对害虫的总体控制。

水稻是我国三大主粮作物之一,我国有大约六成人口将大米作为主食。水稻上害虫发生种类多、为害重,化学农药的使用同样带来了稻田害虫抗药性增加、害虫天敌种群受损和环境污染等一系列问题(Huang et al., 2014)。稻田景观组成会显著影响某一种或几种害虫和天敌的发生(刘雨芳等,2021;朱玉麟等,2021)。海南岛以热带季风气候为主(吴胜安等,2022),水稻种植面积大且早晚稻均有种植,由于温度高导致稻田节肢动物种类多样且发生数量多,害虫为害严重;同时,海南岛景观组成类型丰富多样并相对隔绝,是开展多尺度下景观组成异质性对稻田节肢动物不同功能群影响研究的理想场所。本研究从0.1、0.25、0.5和1.0 km共4个空间尺度探究稻田、半自然生境、城市和森林4种景观组成以及这4类景观斑块多样性对稻田节肢动物各功能群发生数量和多样性的影响,以期选择适宜的空间尺度开展景观格局优化以实现害虫生态调控提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区域:本试验于2022年在海南省文昌市选取了17个村庄中的17块早稻试验田,分别为东阁镇南兴下村、昌洒镇宝彩南村和凤鸣村、文教镇坡柳村和宝典西村、东阁镇田堆村、文城镇松树村和下园

村、潭牛镇东坑村、东路镇长室坑村和美德村、公坡镇上宅村、锦山镇排港中村和恒产村、抱罗镇龙堆村、山头村和后坡村,早稻田面积分别为753.45、1 088.15、608.87、671.94、847.01、1 115.73、484.5、861.93、534.6、699.3、1 106.75、1 097.55、1 072.01、447.83、839.65、775.63和1 084.47 m²。17块早稻田位于东经110.66°~110.91°,北纬19.63°~20.05°,海拔介于2.9~32.3 m之间,稻田两两之间的距离在2 km以上,水稻全生长期不使用化学杀虫剂。

土地覆被数据来源:基于2021年高分二号卫星获得的海南省文昌市0.8 m分辨率的遥感影像图,使用ArcGIS 10.5软件,结合遥感解译和实地核查,获得以17块早稻试验田为圆心、半径为1.0 km的土地覆被类型图,本研究选择稻田、半自然生境(包括草地、灌丛和撂荒地)、森林、城市(包括居住地、工业用地和道路)共4类覆被类型。

试剂和仪器:本试验所用试剂均为国产分析纯。Vortis吸虫器,英国Burkard公司;集思宝G120BD手持GPS定位仪,北京合众思壮科技股份有限公司;双/三目体式显微镜,重庆重光实业有限公司。

1.2 方法

1.2.1 供试早稻田节肢动物的采集

于2022年在水稻拔节期、抽穗扬花期和成熟期分别对早稻田间的节肢动物进行采集,即每块试验田共采集3次,采用Vortis吸虫器进行取样(陈洪凡等,2018)。每次取样时,先在每块试验田长边上找到其1/4、1/2和3/4位置处,分别从这3个位置直线出发,在距离稻田边界至少5 m以上时选择1个点进行取样,即每块稻田选择3个取样点,尽量避免由于边际效应产生的误差(Rand et al., 2006)。水稻拔节期、抽穗扬花期和成熟期取样时的温度分别为24.0、25.0和25.5℃;风速分别为10.2、11.5和9.0 km/h。采集时用长32 cm×宽32 cm×高93 cm的孔径0.2 mm网框先罩住采集点水稻植株,再用吸虫器从网框的上方至下方来回进行取样,吸虫器运行60 s(Zou et al., 2016; Dominik et al., 2018)。计时完毕后取出吸虫器,将采集到的节肢动物置于装有75%酒精的封装瓶中并做好标记后带回实验室,于-20℃低温冰箱中保存。

1.2.2 节肢动物的室内分离和鉴定

将酒精瓶中存储的各时期、各地点采集的样品逐一倒进白瓷盘,按形态将同一种分装到一个塑料

离心管中,使用体式显微镜对离心管中的样品进行拍照,主要包括节肢动物的局部、整体照片,对于较难鉴定的节肢动物加拍口器、触角、头以及翅等关键部位照片。使用Helicon focus 7.0软件对多张不同景深的照片进行合成,使用Adobe Photoshop 25.0.0和Adobe Lightroom Classic 13.1软件对图片进行批量基础调整,包括对比度、明暗场、锐化、色散,从而得到一张明亮清晰的节肢动物标本图,形态相同的归为一组。将分属同一目(蜘蛛纲)的节肢动物图片归为一个文档,并按科属种进行编号,从而制作最终的昆虫图谱。参考何俊华(1979)、何俊华和庞雄飞(1986)、夏松云(1988)、郑乐怡和归鸿(1999a, b)以及傅强等(2021)所撰图谱并请相关分类专家逐一进行鉴定。将鉴定好的节肢动物逐一进行功能群划分,分为植食性害虫(在生态位中以取食来为害水稻的一类节肢动物,如白背飞虱 *Sogatella furcifera* 等)、寄生性天敌(在生态位中能寄生于害虫的一类节肢动物,如寄生蜂等)、捕食性天敌(在生态位中可以直接捕食害虫的一类节肢动物群体,如黑肩绿盲蝽 *Cyrtorhinus lividipennis* 等)和中性昆虫(在生态位中既不为害水稻也不捕食或寄生害虫的一类节肢动物,如蝇类等)共4个功能群(李意成, 2017)。

1.2.3 土地覆被类型面积占比及景观斑块多样性的计算

1.0 km尺度常被用来研究景观组成与农田节肢动物功能群数量和多样性的关系(Bosem et al., 2017; Sirami et al., 2019),本研究最大尺度也选择1.0 km。基于获得的土地覆被类型图,运用Fragstats 4.2景观分析软件依次计算以各供试早稻田中心点为圆心,以0.1、0.25、0.5和1.0 km为半径的圆形范围内,稻田、半自然生境、森林、城市4类土地覆被类型的面积占圆形区域的比例。同时,在上述4个空间尺度下计算4类土地覆被类型的景观斑块多样性,这是表征景观组成型异质性的一个重要变量。本研究采用Shannon-Wiener指数 H' 表征景观斑块多样性,计算公式为 $H' = -\sum (P_i \ln P_i)$, P_i 为第*i*个土地覆被类型面积占调查区域总面积的比例。

1.2.4 景观组成异质性对节肢动物各功能群的影响分析

在0.1、0.25、0.5和1.0 km景观尺度下,利用R 4.3.2软件的lme4包采用线性混合效应模型分析森林、稻田、半自然生境和城市面积占比以及景观斑块多样性对节肢动物各功能群总体发生数量或多样性的影响,以各早稻田地点作为随机效应变量(Bates et al., 2015)。将1.2.2划分的节肢动物各功能群进

一步划分为不同类群,使用线性混合效应模型分析景观组成面积占比和景观斑块多样性对节肢动物各功能群不同类群发生数量的影响(Bates et al., 2015)。各功能群多样性同样使用 Shannon-Wiener 指数 H 表征(李意成, 2017), 计算方法同 1.2.3。

在进行线性混合效应模型分析前,对所有数据进行 $\ln(x+1)$ 转换,以满足数据分析正态性和方差齐性要求(Pinheiro et al., 2024)。此外,在 4 个空间尺度下,对 5 个景观自变量(稻田面积占比、半自然生境面积占比、森林面积占比、城市面积占比和景观斑块多样性)进行空间自相关分析。使用 R 4.3.2 软件 Hmisc 包的 rcorr 函数(Harrell & Dupont, 2003)进行空间自相关分析,采用 PerformanceAnalytics 包的 chart.Correlation 函数(Peterson et al., 2007)进行可视化展示。当 2 个自变量之间的相关系数小于 0.05 时,判断两者显著相关。若 2 个自变量之间显著相关,则只保留 1 个自变量用于线性混合效应模型分析,不同空间尺度保留的自变量尽可能一致,以便于分析自变量影响的尺度效应。采用赤池信息准则(Akaike's information criterion, AIC)筛选各模型的最小 AIC 值,对 $\Delta AIC < 7$ 的模型集进行模型平均化处理(Burnham et al., 2011)。采用 R 4.3.2 软件 Stats 包 confint 函数计算平均化处理的各景观自变量影

响的效应值及其 95% 置信区间。若 95% 置信区间经过零值则景观变量无显著影响,若 95% 置信区间均大于零值则景观变量有显著正效应,若 95% 置信区间均小于零值则景观变量有显著负效应。

2 结果与分析

2.1 稻田节肢动物的发生种类

田间调查取样共采集到节肢动物 2 纲 10 目,其中昆虫纲 172 种,蛛形纲 56 种;按功能群进行统计,植食性昆虫 59 种,共 358 头;捕食性天敌 75 种,共 147 头;寄生性天敌 32 种,共 88 头;中性昆虫 62 种,共 699 头。植食性昆虫主要有叶蝉 Cicadellidae spp. 和白背飞虱等,捕食性天敌主要有步甲 Carabidae spp.、狼蛛 Lycosidae spp.、园蛛 Araneidae spp.、稻红瓢虫 *Micraspis discolor* 和隐翅虫 Staphylinidae spp. 等,中性昆虫主要包括摇蚊 Chironomidae spp. 和蝇 Muscidae spp. 等。

2.2 景观组成异质性对节肢动物发生数量的影响

景观组成异质性指标共 5 个,分别为水稻面积占比、半自然生境面积占比、森林面积占比、城市面积占比、景观斑块多样性,其在不同空间尺度下的数值范围如表 1 所示。

表 1 在 4 个空间尺度下各景观组成异质性指标的数值范围

Table 1 Numerical ranges of landscape compositional heterogeneity indicators at four spatial scales

景观组成变量 Landscape composition variable	0.1 km	0.25 km	0.5 km	1.0 km
水稻面积占比 Proportion of rice areas/%	10-92	2-90	0-76	0-45
半自然生境面积占比 Proportion of semi-natural habitat areas/%	0-50	0-57	2-41	10-51
森林面积占比 Proportion of forest areas/%	0-51	2-51	1-52	19-54
城市面积占比 Proportion of urban areas/%	0-23	3-19	3-15	4-22
景观斑块多样性 Diversity of landscape habitat patches	0.25-1.33	0.30-11.46	0.31-11.46	0.31-11.46

2.2.1 对节肢动物各功能群发生数量的影响

不同节肢动物功能群对景观组成变化的响应程度不同,即植食性害虫整体发生数量对不同空间尺度下的景观组成变化不敏感;而捕食性天敌、寄生性天敌和中性昆虫的整体发生数量对景观组成的变化表现出了显著响应(图 1)。在 0.1 km 空间尺度下,捕食性天敌发生数量对景观斑块多样性呈显著正响应,即随着景观斑块多样性的增加,其发生数量显著增加($P=0.017$);寄生性天敌发生数量在 1.0 km 空间尺度下随着城市面积占比的增加而显著增加($P=0.015$),在 0.25 km 空间尺度下随着景观斑块多

样性的增加而极显著增加($P=0.001$);中性昆虫发生数量在 0.1 km 与 0.25 km 空间尺度下随着景观斑块多样性的增加而显著增加(0.1 km: $P=0.043$; 0.25 km: $P=0.028$)。

2.2.2 对节肢动物各功能群主要类群发生数量的影响

在 0.1 km 空间尺度下,植食性害虫主要类群蝗虫的发生数量随着城市面积占比的增加而显著增加($P=0.040$);对于捕食性天敌的主要类群捕食性甲虫,在 0.5 km 空间尺度下其发生数量随着半自然生境面积占比的增加而显著增加($P=0.034$),在 0.25 km 空间尺度下其发生数量随着景观斑块多样

性的增加而显著增加($P=0.007$);对于中性昆虫的主要类群,在0.1 km空间尺度下蝇类发生数量随着森林景观面积占比的增加而显著减少($P=0.046$),在

0.25 km空间尺度下蚊类发生数量随着景观斑块多样性的增加而显著增加($P=0.049$)(图2)。

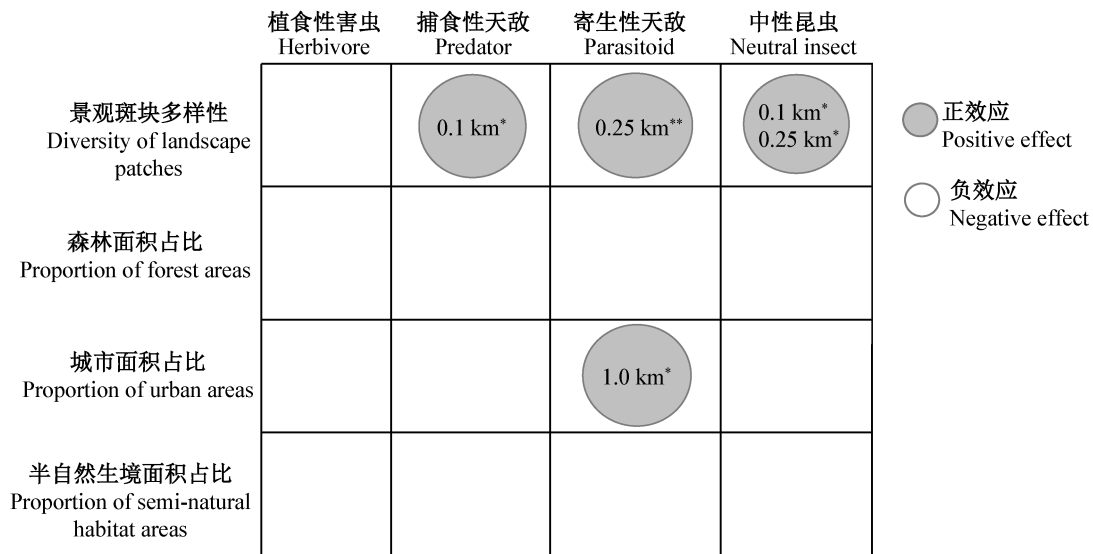


图1 不同空间尺度下稻田景观组成异质性对节肢动物各功能群发生数量的影响

Fig. 1 The influences of rice landscape compositional heterogeneity on the total number of each arthropod functional group at different spatial scales

*: $0.01 < P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

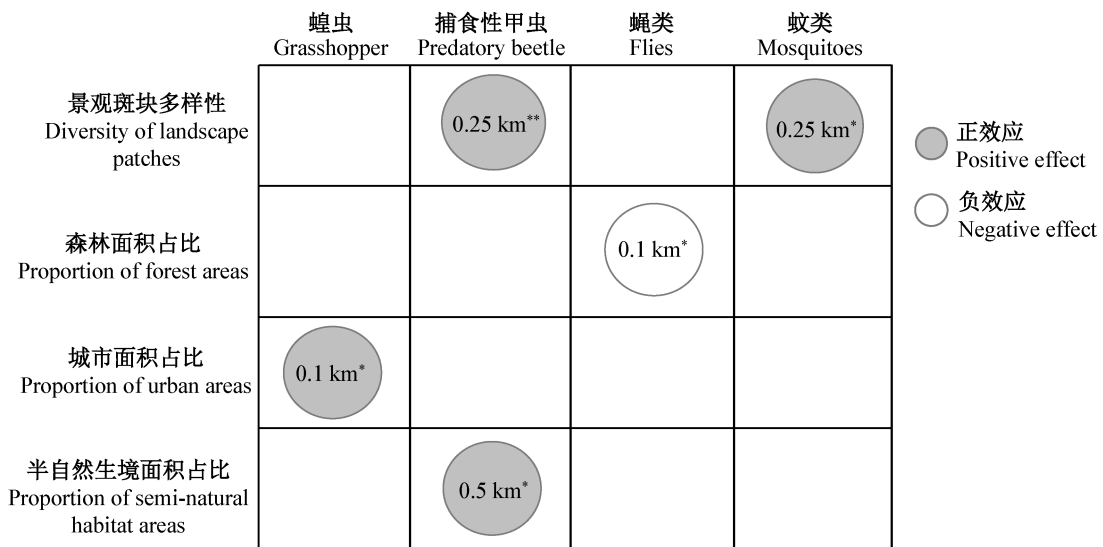


图2 不同空间尺度下稻田景观组成异质性对节肢动物各功能群主要类群发生数量的影响

Fig. 2 The influences of rice landscape compositional heterogeneity on the occurrence number of major groups in each arthropod functional group at different spatial scales

*: $0.01 < P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

2.3 景观组成异质性对节肢动物各功能群多样性的影响

稻田景观组成异质性对植食性害虫的多样性无显著影响;在0.1 km空间尺度下,害虫天敌的多样性与景观斑块多样性呈显著负相关($P=0.034$);在0.5 km空间尺度下,害虫天敌的多样性与半自然生境面积

占比呈显著正相关($P=0.025$);在0.25 km空间尺度下,中性昆虫的多样性与景观斑块多样性呈极显著正相关($P=0.003$);在0.25 km和1.0 km空间尺度下,中性昆虫的多样性与半自然生境面积占比呈显著正相关(0.25 km: $P=0.029$;1.0 km: $P=0.020$)(图3)。

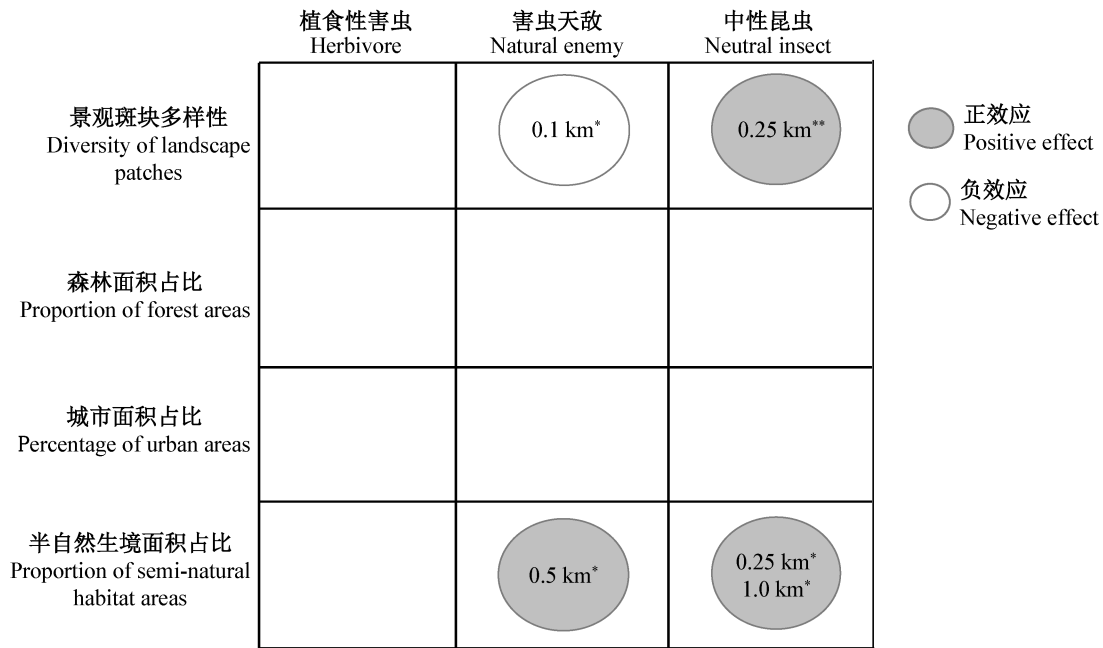


图3 不同空间尺度下稻田景观组成异质性对节肢动物各功能群多样性的影响

Fig. 3 The influences of rice landscape compositional heterogeneity on the Shannon-Wiener index of each arthropod functional group at different spatial scales

*: $0.01 < P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

3 讨论

由于作物害虫及其天敌的扩散能力和生态习性存在差异(Chaplin-Kramer et al., 2011),所以景观组成异质性对害虫控制的影响与所考虑的空间尺度有着紧密联系(Zhang et al., 2020)。因此,了解景观组成异质性对稻田不同节肢动物功能群影响的尺度效应是基于景观优化来提升害虫控制效果的重要环节。本研究结果显示,在小空间尺度(0.1 km和0.25 km)下,海南省文昌市早稻田的景观斑块多样性显著增加了寄生性天敌和捕食性天敌的发生数量;在中空间尺度(0.5 km)下,寄生性天敌和捕食性天敌的多样性随着半自然生境面积占比的增加而增加。究其原因可能是多样化的景观生境能为害虫天敌提供食物、栖息地等多种资源(刘雨芳等, 2021)。因此,在0.5 km空间尺度下,可通过适当增加半自然生境面积(比如在稻田边缘种植蓄养害虫天敌的花带)为稻田害虫天敌多样性的维持创造有利条件(陈学新等, 2014; Gurr et al., 2017)。多样化的生境会干扰害虫天敌对寄主的定位,因此在0.1 km空间小尺度下景观斑块多样性会抑制害虫天敌的多样性,这与张旭珠等(2012)报道捕食性步甲的物种数与100 m尺度范围内半自然生境类型数量呈负相关的结果一致。而数量相对较多的中性昆虫,尽管它

们不直接影响稻田生产,却在稻田生态系统平衡中也发挥着不可替代的作用,如蝇类幼虫可以被寄生蜂寄生,蝇类成虫也能作为稻田害虫天敌蜘蛛的替代食物,有利于天敌群落的维持,间接增加了天敌的种群数量(Settle et al., 1996)。本研究结果显示,在小尺度(0.1 km和0.25 km)下稻田景观异质性可增加中性昆虫的发生数量,这可能是增加害虫天敌发生数量的一个重要原因。吴进才等(1994)研究结果也表明中性昆虫数量减少后,荷氏小宽肩蝽 *Microvelia horvathi*、狼蛛等捕食性天敌数量也随之减少,而有害生物数量则增加。

多样化的农田景观可显著增加害虫天敌的数量和多样性,但有时候无法对害虫起到明显的控制作用(Tscharntke et al., 2016)。在本研究设置的4个空间尺度下,景观组成和景观多样性无论是对植食性害虫的数量还是多样性均未产生明显影响,究其原因一方面可能是虽然景观异质性增加了天敌的发生数量,但其发生高峰期滞后于害虫发生高峰期(Brown, 2011),另一方面可能是由于我国海南省的早稻害虫虫源主要以迁入为主(齐国君等, 2013; 田维逵等, 2018),导致景观异质性的调节作用不明显。与本研究不同的是,在我国南方稻田景观中,捕食性天敌群落物种丰富度、个体数量及多样性与景观异质性等级均无显著正相关关系,但在高异质性

景观稻田中捕食性天敌群落的生态控害效能明显强于在低异质性景观稻田(刘雨芳等,2021),与本研究结果不同的原因可能是稻田天敌发生高峰期滞后于害虫发生高峰期,导致防控效果不理想,表明天敌与害虫发生时间的匹配性对提升害虫控制的作用很关键(吴进才等,1994)。

本研究仅关注了多尺度景观组成格局对节肢动物各功能群结构的影响,而景观配置(比如斑块面积大小、斑块形状等)是如何影响的还未进一步揭示;另外,景观格局如何影响节肢动物各功能群的数量,进而对害虫控制效果及作物产量的影响如何,今后可采用罩笼法等方法进行进一步的研究。

参 考 文 献 (References)

- Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1): 1–48
- Bosem Baillod A, Tschardt T, Clough Y, Batáry P. 2017. Landscape-scale interactions of spatial and temporal cropland heterogeneity drive biological control of cereal aphids. *Journal of Applied Ecology*, 54(6): 1804–1813
- Brown MW. 2011. Importance of early arrival of adult *Harmonia axyridis* for control of *Aphis spiraecola* on apple. *BioControl*, 56(1): 65–69
- Burnham KP, Anderson DR, Huyvaert KP. 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65(1): 23–35
- Chaplin-Kramer R, O’Rourke ME, Blitzer EJ, Kremen C. 2011. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*, 14(9): 922–932
- Chen HF, Lan B, Liang YY, Li XM, Yang YQ. 2018. Analysis of arthropod community composition in paddy fields under sampling by blower-vac machine. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 30(2): 64–67 (in Chinese) [陈洪凡, 兰波, 梁玉勇, 李湘民, 杨迎青. 2018. 吸虫器法取样下稻田节肢动物群落组成分析. *江西农业学报*, 30(2): 64–67]
- Chen XX, Liu YQ, Ren SX, Zhang F, Zhang WQ, Ge F. 2014. Plant-mediated support system for natural enemies of insect pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 1–12 (in Chinese) [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 张帆, 张文庆, 戈峰. 2014. 害虫天敌的植物支持系统. *应用昆虫学报*, 51(1): 1–12]
- DeBach P, Rosen D. 1991. *Biological control by natural enemies*. Cambridge: Cambridge University Press
- Dominik C, Seppelt R, Horgan FG, Settele J, Václavík T. 2018. Landscape composition, configuration, and trophic interactions shape arthropod communities in rice agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 55(5): 2461–2472
- Fu Q, He JC, Lü ZX, Alberto TB. 2021. Identification and utilization of natural enemies of rice pests in China. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press (in Chinese) [傅强, 何佳春, 吕仲贤, 阿尔贝托·塔佩·伯里昂. 2021. 中国水稻害虫天敌的识别与利用. 杭州: 浙江科学技术出版社]
- Gurr GM, Wratten SD, Landis DA, You MS. 2017. Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 62: 91–109
- Harrell F, Dupont C. 2003. Hmisc: Harrell miscellaneous. <https://cran.r-project.org/package=Hmisc>
- He JH. 1979. Atlas of natural enemies of rice pests in Zhejiang Province. Hangzhou: Zhejiang People’s Publishing House (in Chinese) [何俊华. 1979. 浙江省水稻害虫天敌图册. 杭州: 浙江人民出版社]
- He JH, Pang XF. 1986. Atlas of natural enemies of rice pests. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers (in Chinese) [何俊华, 庞雄飞. 1986. 水稻害虫天敌图说. 上海: 上海科学技术出版社]
- Holland JM, Bianchi FJ, Entling MH, Moonen AC, Smith BM, Jeanerret P. 2016. Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies. *Pest Management Science*, 72(9): 1638–1651
- Huang SW, Wang L, Liu LM, Fu Q, Zhu DF. 2014. Nonchemical pest control in China rice: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2): 275–291
- Jaworski CC, Thomine E, Rusch A, Lavoit AV, Wang S, Desneux N. 2023. Crop diversification to promote arthropod pest management: a review. *Agriculture Communications*, 1(1): 100004
- Jaworski CC, Thomine E, Rusch A, Lavoit AV, Xiu CL, Ning D, Lu YH, Wang S, Desneux N. 2022. At which spatial scale does crop diversity enhance natural enemy populations and pest control: an experiment in a mosaic cropping system. *Agronomy*, 12(8): 1973
- Li YC. 2017. The diversity of arthropod communities rice fields at Longji. Master thesis. Haikou: Hainan University (in Chinese) [李意成. 2017. 龙吉稻田节肢动物群落多样性. 硕士学位论文. 海口: 海南大学]
- Liu YF, Yang F, Xie MQ, Tian TT. 2021. Correlations between the natural landscape heterogeneity and the conservation and ecological control efficiency of predatory natural enemies in rice fields in hilly regions of the central Hunan Province. *Journal of Plant Protection*, 48(4): 862–871 (in Chinese) [刘雨芳, 阳菲, 谢美琦, 田滕滕. 2021. 湘中丘陵区自然景观异质性与稻田捕食性天敌保护及生态控害效能的相关性. *植物保护学报*, 48(4): 862–871]
- Ouyang F, Men XY, Guan XM, Xiao YL, Ge F. 2016. Ecological effect of regional agricultural landscape pattern on wheat aphids and their natural enemies. *Scientia Sinica Vitae*, 46(1): 139–150 (in Chinese) [欧阳芳, 门兴元, 关秀敏, 肖云丽, 戈峰. 2016. 区域性农田景观格局对麦蚜及其天敌种群的生态学效应. *中国科学: 生命科学*, 46(1): 139–150]
- Peterson GB, Carl P, Boudt K, Bennet R, Ulrich J, Zivot E, Cornilly D, Hung E, Lestel M, Balkissoon K, et al. 2007. Performance-Analytics: econometric tools for performance and risk analysis. <https://CRAN.R-project.org/package=PerformanceAnalytics>
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Deepayan S. 2024. nlme: linear and nonlinear mixed effects models. <https://cran.r-project.org/web/>

- packages/nlme/index.html
- Qi GJ, Wang Z, Lan RQ, Lv LH. 2013. Occurrence and population characteristics analysis of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) in rice growing region in northern Guangdong Province. *Chinese Journal of Rice Science*, 27(2): 177–183 (in Chinese) [齐国君, 王政, 蓝日青, 吕利华. 2013. 粤北稻区稻纵卷叶螟的发生规律及虫源性质分析. *中国水稻科学*, 27(2): 177–183]
- Rand TA, Tylianakis JM, Tscharntke T. 2006. Spillover edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecology Letters*, 9(5): 603–614
- Sann C, Theodorou P, Heong KL, Villareal S, Settele J, Vidal S, Westphal C. 2018. Hopper parasitoids do not significantly benefit from non-crop habitats in rice production landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254: 224–232
- Schellhorn NA, Bianchi FJJA, Hsu CL. 2014. Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: links to pest suppression. *Annual Review of Entomology*, 59: 559–581
- Settle WH, Ariawan H, Astuti ET, Cahyana W, Hakim AL, Hindayana D, Lestari AS. 1996. Managing tropical rice pests through conservation of generalist natural enemies and alternative prey. *Ecology*, 77(7): 1975–1988
- Sirami C, Gross N, Baillo AB, Bertrand C, Carrié R, Hass A, Henckel L, Miguet P, Vuillot C, Alignier A, et al. 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(33): 16442–16447
- Symondson WOC, Sunderland KD, Greenstone MH. 2002. Can generalist predators be effective biocontrol agents? *Annual Review of Entomology*, 47: 561–594
- Tian WK, Li CJ, Wu Y. 2018. Population dynamics and source areas of the white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Horváth) in Menghai, Yunnan Province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(3): 329–337 (in Chinese) [田维遼, 李朝疆, 吴俨. 2018. 云南勐海早稻白背飞虱种群动态及虫源地分析. *应用昆虫学报*, 55(3): 329–337]
- Tscharntke T, Karp DS, Chaplin-Kramer R, Batáry P, DeClerck F, Gratton C, Hunt L, Ives A, Jonsson M, Larsen A, et al. 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control: five hypotheses. *Biological Conservation*, 204: 449–458
- Wen Z, Yang QF, Huang BB, Zhang L, Zheng H, Shen YS, Yang YZ, Ouyang ZY, Li RN. 2023. Landscape composition and configuration relatively affect invasive pest and its associator across multiple spatial scales. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7: 1114508
- Wu JC, Hu GW, Tang J, Shu ZL, Yang JS, Wan ZN, Ren ZC. 1994. Studies on the regulation effect of neutral insect on the community food web in paddy field. *Acta Ecologica Sinica*, 14(4): 381–386 (in Chinese) [吴进才, 胡国文, 唐健, 束兆林, 杨金生, 万志农, 任正才. 1994. 稻田中性昆虫对群落食物网的调控作用. *生态学报*, 14(4): 381–386]
- Wu KM. 2018. Development direction of crop pest control science and technology in China. *Journal of Agriculture*, 8(1): 35–38 (in Chinese) [吴孔明. 2018. 中国农作物病虫害防控科技的发展方向. *农学学报*, 8(1): 35–38]
- Wu SA, Xing CY, Zhu JJ. 2022. Analysis of climate characteristics in Hainan Island. *Journal of Tropical Biology*, 13(4): 315–323 (in Chinese) [吴胜安, 邢彩盈, 朱晶晶. 2022. 海南岛气候特征分析. *热带生物学报*, 13(4): 315–323]
- Xia SY. 1988. Primary-colored iconograph of entomophagous insects in paddy fields. Changsha: Hunan Science & Technology Press (in Chinese) [夏松云. 1988. 稻田天敌昆虫原色图册. 长沙: 湖南科学技术出版社]
- Yang QF, Li Z, Ouyang F, Men XY, Zhang KN, Liu M, Guo W, Zhu CG, Zhao WL, Reddy GVP, et al. 2023. Flower strips promote natural enemies, provide efficient aphid biocontrol, and reduce insecticide requirement in cotton crops. *Entomologia Generalis*, 43(2): 421–432
- Yang QF, Men XY, Zhao WL, Li C, Zhang QQ, Cai ZP, Ge F, Ouyang F. 2021. Flower strips as a bridge habitat facilitate the movement of predatory beetles from wheat to maize crops. *Pest Management Science*, 77(4): 1839–1850
- Zhang XZ, Chang H, Zhang X, Duan MC, Li X, Yu ZR, Liu YH. 2012. Temporal patterns of carabid beetle diversity in agro-landscape in relation to landscape structure. *Chinese Journal of Ecology*, 31(12): 3127–3132 (in Chinese) [张旭珠, 常虹, 张鑫, 段美春, 李骁, 宇振荣, 刘云慧. 2012. 农业景观步甲多样性时间格局及其与景观结构的关系. *生态学杂志*, 31(12): 3127–3132]
- Zhang YJ, Haan NL, Landis DA. 2020. Landscape composition and configuration have scale-dependent effects on agricultural pest suppression. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302: 107085
- Zhao ZH, Ouyang F, Men XY, Liu JH, He DH, Ge F. 2013. Habitat management in biological control. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(4): 879–889 (in Chinese) [赵紫华, 欧阳芳, 门兴元, 刘军和, 贺达汉, 戈峰. 2013. 生境管理: 保护性生物防治的发展方向. *应用昆虫学报*, 50(4): 879–889]
- Zheng LY, Gui H. 1999a. Insect taxonomy: volume 1. Nanjing: Nanjing Normal University Press (in Chinese) [郑乐怡, 归鸿. 1999a. 昆虫分类: 上册. 南京: 南京师范大学出版社]
- Zheng LY, Gui H. 1999b. Insect taxonomy: volume 2. Nanjing: Nanjing Normal University Press (in Chinese) [郑乐怡, 归鸿. 1999b. 昆虫分类: 下册. 南京: 南京师范大学出版社]
- Zhu YL, Chen JH, Huang XL, Xiao HJ. 2021. Dynamics of egg parasitoids of *Chilo suppressalis* and its response to landscape structure in northern Jiangxi. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(5): 870–876 (in Chinese) [朱玉麟, 陈俊晖, 黄孝龙, 肖海军. 2021. 赣北二化螟卵寄生蜂寄生率动态及其对景观结构的响应. *中国生物防治学报*, 37(5): 870–876]
- Zou Y, van Telgen MD, Chen JH, Xiao HJ, de Kraker J, Bianchi FJJA, van der Werf W. 2016. Modification and application of a leaf blower-vac for field sampling of arthropods. *Journal of Visualized Experiments*, (114): e54655

(责任编辑: 李美娟)