

DOI: 10.20103/j.stxb.202302080212

黄兰媚, 闫雪影, 樊林染, 张艳军, 刘红梅, 张海芳, 赵建宁, 杨殿林, 王慧. 植草带宽度对蜘蛛和步甲群落动态及比邻玉米田害虫发生的影响. 生态学报, 2024, 44(3): 1079-1091.

Huang L M, Yan X Y, Fan L R, Zhang Y J, Liu H M, Zhang H F, Zhao J N, Yang D L, Wang H. Effects of grassy strip width on the dynamics of spider and carabid communities and pest occurrence in adjacent maize fields. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1079-1091.

植草带宽度对蜘蛛和步甲群落动态及比邻玉米田害虫发生的影响

黄兰媚^{1,2}, 闫雪影^{1,2}, 樊林染^{1,2}, 张艳军^{1,2}, 刘红梅^{1,2}, 张海芳^{1,2}, 赵建宁^{1,2}, 杨殿林^{1,2}, 王 慧^{1,2,*}

1 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191

2 天津市农田生态与环境修复技术工程中心, 天津 300191

摘要: 农田边界植草带是农田系统各斑块间生物物种迁移和群落演替、物质和能量交换的主要区域, 对维持农业生物多样性及提高农田生产力具有重要意义。基于作物-害虫-天敌互作有机整体对植草带宽度的响应, 选取不同宽度植草带(2 m、4 m、6 m)及其比邻农田并以对应宽度作物边界作为对照, 采用地表陷阱法对蜘蛛和步甲进行取样调查, 探究植草带宽度对蜘蛛和步甲种群结构、迁移扩散规律以及对农田害虫控制潜力的影响。结果表明: 植草带内蜘蛛和步甲个体数均显著高于对照条带, 4 m、6 m 植草带的蜘蛛和步甲多度显著高于 2 m 植草带, 且物种丰富度和多度显著高于其对照条带。此外, 不同宽度植草带蜘蛛和步甲群落存在较高的异质性, 蜘蛛和步甲群落结构差异显著; 在 4 m 和 6 m 植草带及其比邻玉米田内, 蜘蛛和步甲多度在植草带和植草带与比邻玉米田交界处显著高于农田内部, 且随距离的增加, 蜘蛛物种多度呈显著降低趋势, 植草带宽度和距离共同决定蜘蛛和步甲的空间分布; Monte Carlo 检验结果表明, 植草带宽度、植被 Margalef 指数对农田中蜘蛛和步甲群落结构的影响均达到显著水平, 蜘蛛主要优势科和步甲主要优势种主要分布在 6 m 植草带比邻玉米田内; 4 m、6 m 植草带比邻的玉米田中蜘蛛和步甲对玉米害虫的益害比显著高于 2 m 植草带比邻的玉米田, 且 4 m、6 m 植草带显著增加了玉米籽粒的百粒重及比邻农田的玉米总产量。本研究对植草带涵养捕食性天敌预防害虫发生的最适宽度进行探索, 综合考虑植草带耕地占用、天敌涵养和生物控害潜力等因素, 确定 4 m 宽度植草带是具有推广价值的农田边界模式。

关键词: 农田边界; 植草带宽度; 天敌; 生物控害

Effects of grassy strip width on the dynamics of spider and carabid communities and pest occurrence in adjacent maize fields

HUANG Lanmei^{1,2}, YAN Xueying^{1,2}, FAN Linran^{1,2}, ZHANG Yanjun^{1,2}, LIU Hongmei^{1,2}, ZHANG Haifang^{1,2}, ZHAO Jianning^{1,2}, YANG Dianlin^{1,2}, WANG Hui^{1,2,*}

1 Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China

2 Tianjin Engineering Research Center of Agricultural and Environmental Remediation Technology, Tianjin 300191, China

Abstract: Grassy strip is the main area for species migration, community succession, matter and energy exchange among patches of farmland system, which is of great importance for maintaining agricultural biodiversity and improving farmland productivity. Based on the crop-pest-natural enemy interactions, grassy strips with different widths (2 m, 4 m, 6 m) and their neighboring fields as well as the crop strips with the same widths were selected. The samples of spider and carabid were

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271651); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2021-jbkyywf-wh)

收稿日期: 2023-02-08; **网络出版日期:** 2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanghui03@caas.cn

collected by the method of pitfall traps. Then we investigated the effects of grassy strip width on species population, movement rules, and the potential of pest control in farmland. The results showed that the number of spider and carabid individuals in grassy strip was significantly higher than that in crop strip, the abundance of spiders and carabids species in 4 m and 6 m grassy strip was significantly higher than that in 2 m grassy strip, and the species richness and abundance in grassy strip were significantly higher than that in crop strip. In addition, there was high heterogeneity of spider and carabid communities in different widths of the grassy strip. In 4 m and 6 m grassy strips and their adjacent maize fields, the abundance of spiders and carabids was significantly higher in grassy strip and the junction between the grassy strip and their adjacent maize field than that in the fields. With the increase of distance to grassy strip, the spider species abundance showed a significant decrease trend. The width of the grassy strip and the distance jointly determined the spatial distribution of spiders and carabids. The results of Monte Carlo test showed that both the width of grassy strips and the Margalef index of vegetation had a significant impact on the community structure of spiders and carabids. Meanwhile, both the dominant families of spiders and the dominant species of carabids were distributed in the corn field adjacent to 6 m grassy strip. The ratios of spider and carabid to maize pests were significantly higher in 4 m and 6 m grassy strip than that in 2 m grassy strip. The maize field with 4 m and 6 m grassy strip had significantly increased the hundred-grain weight of maize grains and the total yield of maize compared with common maize field. The study indicates that the grassy strip is of great importance for conserving predatory natural enemies to prevent pest occurrence in maize field. Taking into account the field occupation, conservation of natural enemy and biological control of pests, we suggest that the grassy strip of 4 m width is the most potential farmland boundary model for popularization.

Key Words: field margins; width of grassy strip; natural enemy; biological control of pests

农业集约化导致农田生境破碎化和景观均质化程度不断加深^[1], 频繁耕作及化肥农药的不合理施用加剧动物栖息地退化, 造成农田系统中动植物多样性的急剧下降^[2], 严重削弱天敌对害虫的调控作用, 威胁农业可持续发展。探索农业生物多样性有效维持措施, 一直是农业生态学领域的研究热点。

农田边界作为农业生态系统中重要的非作物生境, 是农田系统各斑块间生物物种迁移和群落演替、物质和能量交换的主要区域^[3], 对维持农业生物多样性及提高农田生产力具有重要意义^[4]。农田边界按植物组成可分为林带、灌木植物篱、植草带和花带 4 类^[5]。其中, 植草带和花带在为天敌生物提供食物、越冬栖息地、巢穴和躲避农业干扰的庇护所方面效果显著^[6], 使天敌能够在农田系统生存定居并捕食作物害虫^[7]。利用植草带和花带进行农田系统害虫综合治理不仅能够减少农作物生产对化学农药的依赖, 也有利于提高农田生物多样性^[8], 同时对于水土保持^[9]、空气净化、有机残留物及有毒物质分解等均有重要作用^[10]。非作物生境在农业景观中所占比例直接影响农田生物多样性^[11], 比如植草带的面积比例会显著影响昆虫群落的格局^[12], 植草带宽度效应能直观反应农田边界对作物—害虫—天敌三者之间形成的互作有机整体的影响^[13]。

蜘蛛 (Araneida) 和步甲 (Carabid Beetles) 均为农田系统的重要天敌, 对作物害虫具有显著持续性的控制作用^[14], 而且这两个天敌类群对大尺度景观变化或环境变化的响应非常敏感^[15], 常用作反映生物多样性变化的指示生物。已有研究证实, 农田蜘蛛的多样性随农田景观中非作物生境比例的增加而显著提高^[16]; 无论步甲优势种还是稀有种, 都趋向于农田边界处生存, 植草带对比邻农田的步甲多样性具有提升作用^[17]。已有研究探索了自然/半自然农田边界的组成和构型对农业生物多样性和作物病虫害调控的影响及其机制^[18], 然而人工建植的植草带对捕食性天敌多样性、迁移扩散规律的影响方面研究不足, 植草带涵养捕食性天敌防控害虫发生的最适宽度仍需要系统深入研究。本文以人工建植的不同宽度植草带为对象, 研究植草带宽度对蜘蛛和步甲群落结构及比邻玉米田主要害虫发生的影响, 揭示植草带涵养捕食性天敌蜘蛛和步甲种群的宽度效应以及天敌群落与比邻玉米田主要害虫发生的消长规律, 为集约化农田边界植草带构建、植草带涵养捕食性天敌调控害虫发生技术的研究提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

本试验位于山东省德州市齐河县宋坊农场(116°58'58"E, 36°64'34"N), 该地区属于暖温带半湿润季风气候区, 冷热季和干湿季明显, 海拔 20 m, 年平均气温 13.4 °C, 年降水量 622 mm, 无霜期 217 d。试验地土壤类型为潮土, 土壤 pH 值为 7.93, 有机质含量为 9.47 g/kg, 铵态氮含量为 4.48 mg/kg, 硝态氮含量为 15.15 mg/kg, 全氮含量为 1.44 g/kg, 速效磷含量为 16.10 mg/kg。本地多采用冬小麦—夏玉米轮作种植体系。

植草带于 2019 年 10 月建植, 在保留本土植物的基础上, 引入了一些功能植物, 2021 年调查植草带内植物种类包括黑麦草 (*Lolium perenne*)、马唐 (*Digitaria sanguinalis*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、苜蓿 (*Medicago sativa*)、野豌豆 (*Vicia sepium*)、白车轴草 (*Trifolium repens*)、红车轴草 (*Trifolium pratense*)、菊苣 (*Cichorium intybus*)、菊芋 (*Helianthus tuberosus*)、秋英 (*Cosmos bipinnatus*)、大滨菊 (*Leucanthemum maximum*)、刺儿菜 (*Cirsium arvense*)、铁苋菜 (*Acalypha australis*)、苋 (*Amaranthus tricolor*)、马齿苋 (*Portulaca oleracea*)、藜 (*Chenopodium album*)、酸浆 (*Alkekengi officinarum*)、牵牛 (*Ipomoea nil*)、铜锤玉带草 (*Lobelia nummularia*)、马兜铃 (*Zehneria japonica*)、鼠尾草 (*Salvia japonica*)。试验期间对植草带进行宽泛管理, 根据植株生长情况每年割草 2—3 次, 且不投入肥料和农用化学品。

1.2 试验设计

2021 年 7—9 月, 选取宽度分别为 2 m、4 m 和 6 m 的植草带 (TC、FC 和 SC) 及其比邻玉米农田展开调查, 同时选取宽度分别为 2 m、4 m 和 6 m 的玉米作物边界 (TCK、FCK 和 SCK) 作为对照条带, 共计 3 组处理 (TC 和 TCK、FC 和 FCK、SC 和 SCK), 每组处理 4 次重复, 植草带和对照条带长度均为 100 m, 且彼此间距大于 100 m。根据玉米害虫的危害期以及天敌的生物调控作用, 选择在玉米大喇叭口期 (7 月 26 日至 8 月 2 日) 和抽丝灌浆期 (8 月 23 日至 8 月 30 日), 采用地表陷阱法^[19]对蜘蛛和步甲进行取样调查。为探究植草带对蜘蛛和步甲类群的涵养效应, 在不同宽度植草带及其对照条带中心线处布设陷阱收集地表动物; 为探究植草带宽度对蜘蛛和步甲迁移扩散规律的影响, 在植草带与比邻玉米田交界处布设双向陷阱, 同时在植草带中心线 Z、条带内距植草带与比邻玉米田交界处 1 m 处 (-1 m), 植草带与比邻玉米田交界处 (0 m), 比邻玉米田内距植草带与比邻玉米田交界处 1 m、3 m、10 m、20 m、30 m 处分别布设陷阱收集地表动物。每条草带设置 4 组陷阱, 每组陷阱 3 个平行, 为避免陷阱间相互影响, 各组陷阱间距大于 20 m。具体样点布置如图 1, 陷阱所用的塑料杯口径 7.8 cm、深 10 cm, 杯中倒入 1/3 的饱和食盐水并添加几滴洗洁精, 杯口与地面齐平。陷阱放置 48 h 后, 回收塑料杯内的节肢动物样本, 每组陷阱的 3 个平行合并为一个样品, 放入装有 75% 酒精的塑料瓶中带回实验室鉴定。

1.3 蜘蛛和步甲种类鉴定

物种鉴定主要参考《中国土壤动物检索图鉴》、《天敌昆虫图鉴》、《辽宁甲虫原色图鉴》、《中国蜘蛛生态大图鉴》、《昆虫分类学》等。蜘蛛鉴定到科, 步甲鉴定到种, 部分样品请河北大学和北京林业大学相关专家鉴定。

1.4 植草带植被组成调查

在玉米大喇叭口期、抽丝灌浆期和收获期对植草带的植被组成进行 3 次调查。在植草带内随机设置 4 个 1 m × 1 m 的样方, 记录样方内植物物种种类、物种多度和盖度, 计算各处理的物种丰富度、Shannon 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数。

1.5 玉米田主要害虫和产量调查

玉米田主要害虫发生情况调查于玉米抽丝期 (2021 年 8 月) 和玉米灌浆期 (9 月) 进行。采用平行线法^[19], 并稍作调整, 具体为: 在玉米田距离植草带与比邻玉米田交界处 1 m 和 10 m 处分别进行调查, 每组调查 4 次重复, 每次重复随机选取 20 株玉米。记录棉铃虫、玉米螟、桃蛀螟、粘虫和蚜虫等玉米害虫的种类及虫

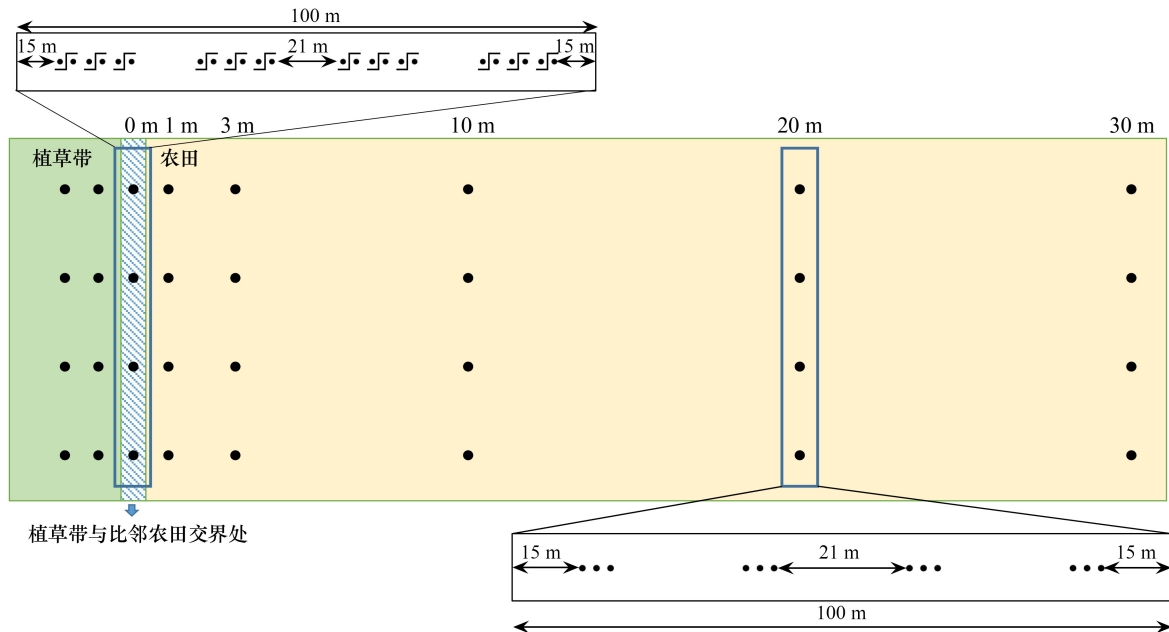


图 1 样点布置图

Fig.1 Layout of sampling sites

数,调查株数和受害株数,计算受害株率。

玉米测产采用平行线法,在玉米田距植草带与比邻玉米田交界处 1 m 和 10 m 处分别选取一行玉米,每行随机调查 20 株玉米,共计 80 株,统计玉米穗粒数,百粒重和产量,在自然风干后进行称重、测定,并选取 1 m 和 10 m 距离处玉米植株果穗进行产量统计分析。

1.6 数据分析

采用单因素方差分析比较蜘蛛和步甲种群差异。采用基于 CNESS (Chord-Normalized Expected Species Shared) 相似系数的非度量多维尺度法 (Non-metric Multi-Dimensional Scaling, NMDS) 分析比较蜘蛛和步甲群落结构的相似性。以玉米田不同距离取样带蜘蛛和步甲物种多度作为响应变量,以植草带宽度、取样距离及交互作用作为固定效应变量,采用一般线性回归分析探讨蜘蛛和步甲的溢出效应。植草带植被特征用植草带宽度、Shannon 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数 5 个指标来表征,采用冗余分析法 (Redundancy Analysis, RDA) [20] 分析植草带对蜘蛛和步甲群落结构和分布的影响。方差分析和一般线性回归采用 SAS 9.4 进行 [21], 多重比较方法采用 Duncan 新复极差多重比较方法,非度量多维尺度法 (NMDS) 分析采用 R 4.0.2 [22], RDA 分析过程选用 CANOCO5 进行 [23]。

2 结果与分析

2.1 植草带及对照条带内天敌群落组成差异

植草带内共采集到蜘蛛 442 头,分属于 10 个科,狼蛛科 (Lycosidae) 为优势科,其个体数占蜘蛛个体总数的 53.62%,常见科为类球蛛科 (Nesticidae)、皿蛛科 (Linyphiidae) 和卷叶蛛科 (Dictynidae),分别占蜘蛛个体总数的 17.87%、12.90% 和 10.41%;对照条带内共采集到蜘蛛 206 头,分属于 5 个科,狼蛛科为优势科,其个体数占蜘蛛个体总数的 34.47%,常见科为卷叶蛛科、类球蛛科和皿蛛科,分别占蜘蛛个体总数的 21.84%、21.36% 和 21.36% (表 1)。植草带内蜘蛛科数和个体数均显著高于对照条带。

植草带内共采集到步甲 119 头,分属于 14 个种,优势种为黄斑青步甲 (*Chlaenius mican*)、单齿婪步甲 (*Harpalus simplicidens*),分别占步甲个体总数的 22.68% 和 21.01%;对照条带内共采集到步甲 36 头,分属于

8 个种,优势种为暗星步甲(*Calosoma lugens*),占步甲个体总数的 33.33%(表 1)。植草带内步甲物种数和个体数均显著高于对照条带。

表 1 不同宽度植草带内蜘蛛和步甲群落组成
Table 1 Composition of spiders and carabids in grassy strips with different widths

类群 Group	编码 Code	科/种 Family or species	个体数 Abundance					
			TC	FC	SC	TCK	FCK	SCK
蜘蛛 Spider	Fa1	漏斗蛛科 Agelenidae	3	0	3	0	0	0
	Fa2	管巢蛛科 Clubionidae	0	2	0	0	0	0
	Fa3	卷叶蛛科 Dictynidae	2	25	19	8	18	19
	Fa4	平腹蛛科 Gnaphosidae	2	1	1	2	0	0
	Fa5	皿蛛科 Linyphiidae	14	15	28	16	12	16
	Fa6	狼蛛科 Lycosidae	39	96	102	18	27	26
	Fa7	类球蛛科 Nesticidae	5	47	27	5	18	21
	Fa8	跳蛛科 Salticidae	0	1	1	0	0	0
	Fa9	球蛛科 Theridiidae	1	1	2	0	0	0
	Fa10	蟹蛛科 Thomisidae	0	3	2	0	0	0
步甲 Carabid	Sp.1	大暗黑步甲 <i>Amara gigantus</i>	0	2	0	0	0	0
	Sp.2	普通暗黑步甲 <i>Amara plebeja</i>	0	0	1	1	1	0
	Sp.3	暗星步甲 <i>Calosoma lugens</i>	2	0	6	4	2	6
	Sp.4	麻青步甲 <i>Chlaenius junceus</i>	0	4	0	0	0	0
	Sp.5	黄斑青步甲 <i>Chlaenius micans</i>	2	10	15	4	0	4
	Sp.6	点沟青步甲 <i>Chlaenius praefactus</i>	0	1	0	0	0	0
	Sp.7	蠋步甲 <i>Dolichus halensis</i>	2	8	2	0	2	0
	Sp.8	雕角小步甲 <i>Dyschirius glypturus</i>	0	1	0	0	0	0
	Sp.9	淡鞘婪步甲 <i>Harpalus pallidipennis</i>	0	0	0	0	1	0
	Sp.10	单齿婪步甲 <i>Harpalus simplicidens</i>	1	16	8	0	1	0
	Sp.11	四斑扁须步甲 <i>Panagaeus davidi</i>	1	0	0	0	0	0
	Sp.12	广屁步甲 <i>Pheropsophus occipitalis</i>	2	4	1	0	0	0
	Sp.13	单齿婪步甲 <i>Scarites terricola</i>	0	12	1	0	0	0
	Sp.14	四斑小步甲 <i>Tachys gradatus</i>	0	0	7	0	2	1
	Sp.15	迅小步甲 <i>Tachys nanus</i>	0	3	7	1	2	4

TC: 2 m 植草带 2 m grassy strip; FC: 4 m 植草带 4 m grassy strip; SC: 6 m 植草带 6 m grassy strip; TCK: 2 m 玉米作物对照条带 2 m crop strip; FCK: 4 m 玉米作物对照条带 4 m crop strip; SCK: 6 m 玉米作物对照条带 6 m crop strip

单因子方差分析结果显示(图 2),4 m、6 m 植草带的蜘蛛多度($F=55.23, P<0.0001$)极显著高于 2 m 植草带,且 4 m、6 m 植草带的蜘蛛物种丰富度($F=4.40, P=0.0086$)和多度($F=57.01, P<0.0001$)极显著高于其对照条带;4 m、6 m 植草带的步甲物种丰富度($F=5.33, P=0.0297$)和多度($F=5.53, P=0.0271$)显著高于 2 m 植草带,且 4 m、6 m 植草带的步甲物种丰富度($F=6.63, P=0.0012$)、多度($F=7.21, P=0.0007$)和 Shannon 多样性指数($F=4.32, P=0.0093$)均显著高于其对照条带。

NMDS 分析结果显示(图 3),6 m 植草带的蜘蛛群落高度聚集在一起,2 m、4 m 植草带的蜘蛛群落较为聚集,对照条带内的蜘蛛群落均较为分散,4 m、6 m 植草带的蜘蛛群落更多地集中于第一排序轴右侧,2 m 植草带和各宽度对照条带的蜘蛛均更倾向于分布于第一排序轴左侧;而步甲群落则表现为 4 m、6 m 植草带的群落较为聚集,2 m 植草带和各宽度对照条带的步甲群落较为分散。综上所述,不同宽度植草带间蜘蛛和步甲群落存在较高的异质性。

2.2 蜘蛛和步甲的迁移扩散及空间分布规律

以双向陷阱两个方向的物种丰富度和多度差异来判断蜘蛛和步甲类群迁移扩散的方向。无论是植草带

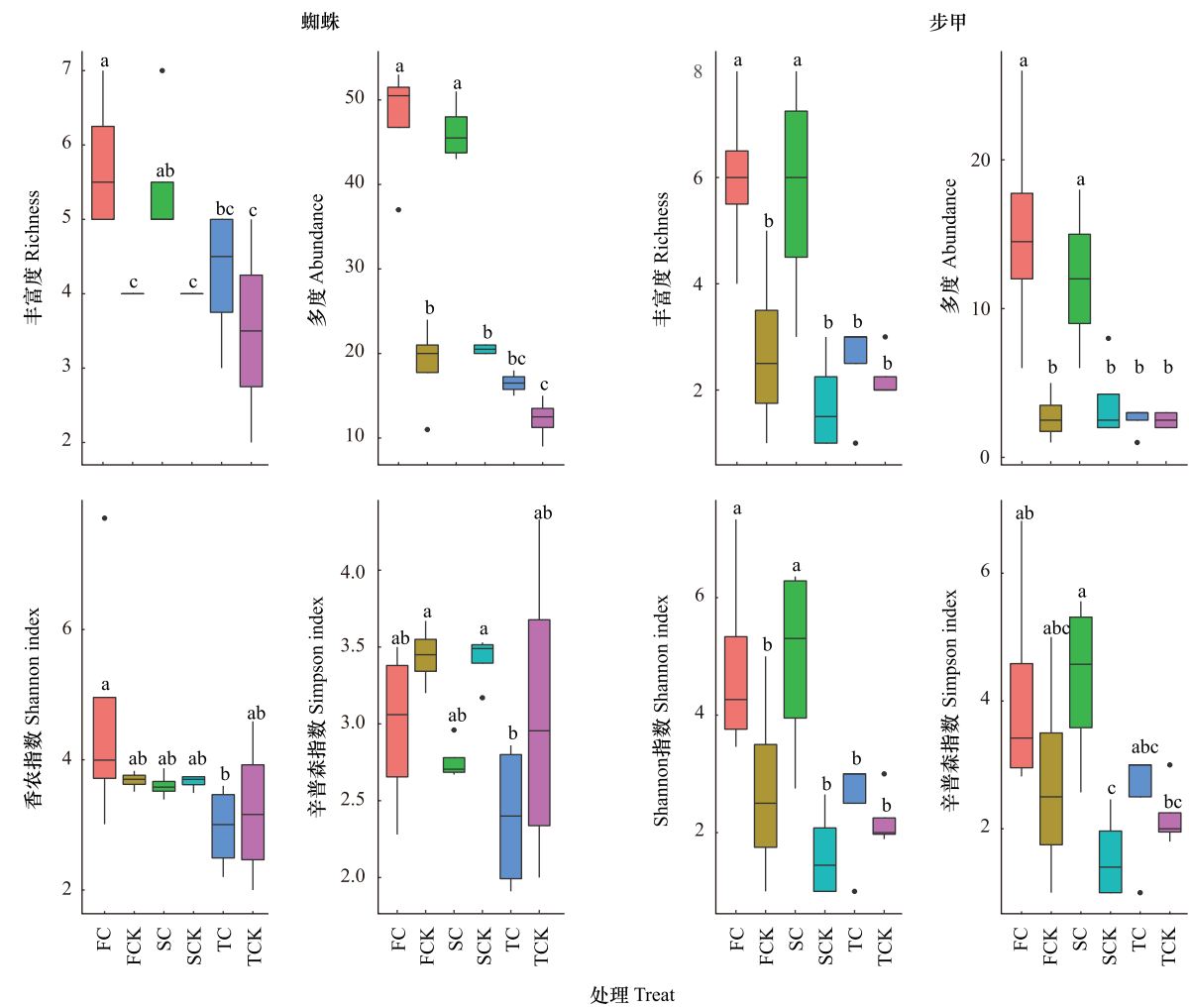


图2 植草带及其对照条带内蜘蛛和步甲的群落多样性

Fig.2 Community diversity of spider and carabid in grassy and crop strips

TC: 2 m 植草带 2 m grassy strip; FC: 4 m 植草带 4 m grassy strip; SC: 6 m 植草带 6 m grassy strip; TCK: 2 m 玉米作物对照条带 2 m crop strip; FCK: 4 m 玉米作物对照条带 4 m crop strip; SCK: 6 m 玉米作物对照条带 6 m crop strip; 不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)

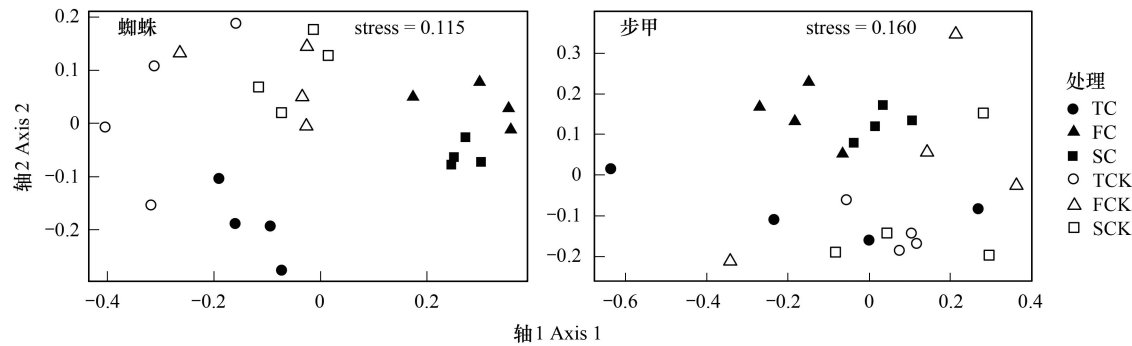


图3 植草带内蜘蛛群落和步甲群落的非度量多维分析 (NMDS)

Fig.3 Non-linear multi-dimensional scaling (NMDS) based on Chord Measure for spiders and carabids assemblages in grassy strips

还是对照条带,植草带蜘蛛和步甲从农田边界向农田内部或从农田内部向农田边界迁移扩散规律的差异均不显著(表2)。

表 2 植草带对蜘蛛和步甲迁移扩散规律的影响

Table 2 Effects of grassy strips on the migration and diffusion of spiders and carabids

类群 Group	处理 Treatment	扩散方向 Dispersal direction	物种丰富度 Species richness			多度 Abundance		
			均值 Mean	<i>F</i>	<i>P</i>	均值 Mean	<i>F</i>	<i>P</i>
步甲 Carabid	TC	M—F	1.25	0.10	0.766	1.25	0.53	0.494
		F—M	1.50			2.00		
	FC	M—F	0.75	1.27	0.303	0.75	1.26	0.305
		F—M	2.00			2.25		
	SC	M—F	2.00	0.77	0.414	2.75	0.77	0.413
		F—M	2.75			3.75		
	TCK	M—F	0.75	0	1.000	0.75	0	1.000
		F—M	0.75			0.75		
	FCK	M—F	0.50	1.00	0.356	0.50	1.00	0.356
		F—M	1.00			1.00		
	SCK	M—F	1.00	0.16	0.705	1.25	0.07	0.801
		F—M	0.75			1.00		
蜘蛛 Spider	TC	M—F	6.75	0.87	0.387	16.25	0	0.948
		F—M	7.50			16.50		
	FC	M—F	5.75	0.26	0.304	11.50	0.59	0.470
		F—M	6.75			16.00		
	SC	M—F	7.00	1.42	0.278	14.25	2.19	0.190
		F—M	5.50			9.50		
	TCK	M—F	5.75	0	1.000	18.25	5.76	0.053
		F—M	5.75			14.75		
	FCK	M—F	4.25	4.14	0.088	7.50	3.50	0.110
		F—M	7.75			15.25		
	SCK	M—F	6.25	0.89	0.382	11.75	0.04	0.847
		F—M	7.25			12.25		

M—F: 从农田边界(植草带或对照条带)向农田内部移动 From margin to field; F—M: 从农田内部向农田边界移动 From field to margin

以天敌物种多度随距离增加或递减来反应蜘蛛和步甲的溢出效应(图 4)。在 4 m 和 6 m 植草带及其比邻的玉米田内,蜘蛛多度在植草带和植草带与比邻玉米田交界处显著高于玉米田内部,且随着距离的增加,蜘

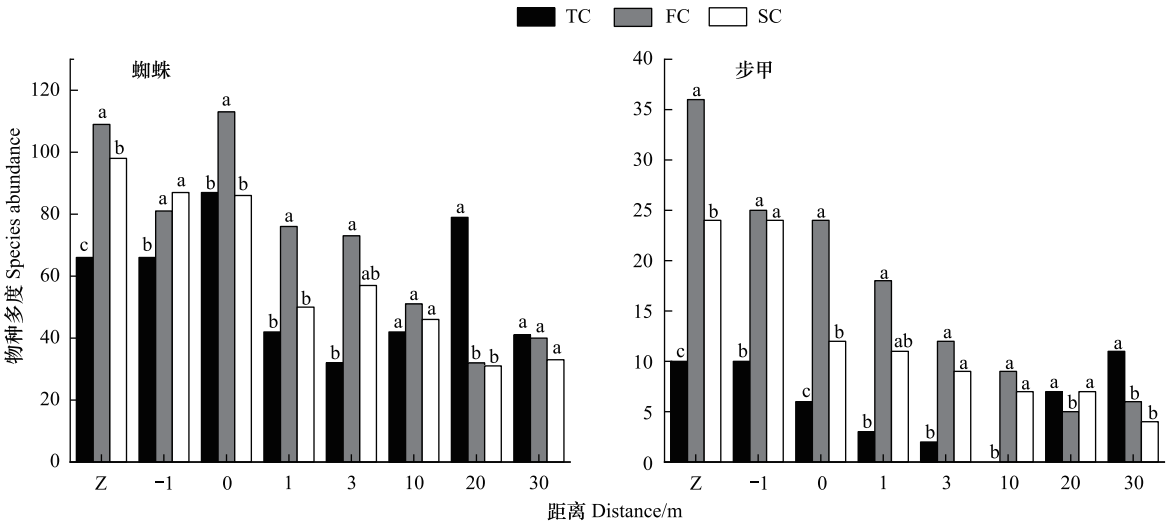


图 4 植草带宽度和距离对蜘蛛、步甲溢出效应的影响

Fig.4 Effects of width and distance of grassy strips on spider and carabid Spillover effects

Z: 植草带中心线 Grassy strip center line

蛛物种多度显著降低。比较植草带内距植草带与比邻玉米田交界处 1 m 处和农田内距植草带与比邻玉米田交界处 1 m 处步甲多度,表现为植草带显著高于农田内部,4 m、6 m 植草带比邻的玉米田内步甲溢出效应显著。

以植草带比邻玉米田距 Z 线(植草带中心线)不同距离处蜘蛛和步甲的物种多度差异来反映植草带宽度和距离对蜘蛛和步甲空间分布的影响。一般线性模型分析结果显示(表 3),植草带宽度对植草带内蜘蛛和步甲类群的空间分布无显著影响(蜘蛛: $F=1.58, P=0.2583$; 步甲: $F=2.23, P=0.1637$),而距植草带的距离有显著影响(蜘蛛: $F=103.71, P<0.0001$; 步甲: $F=105.56, P<0.0001$),且植草带宽度和距离有显著交互作用(蜘蛛: $F=9.51, P=0.0011$; 步甲: $F=11.25, P=0.0005$),植草带宽度和距离共同决定蜘蛛和步甲的空间分布。

表 3 植草带宽度和距离对蜘蛛和步甲物种多度的影响
Table 3 Effect of width and distance of grassy strips on spider and carabid abundance

响应变量 Response variables	自变量 Independent variables	<i>F</i>	<i>P</i>
蜘蛛多度 Spider abundance	植草带宽度	1.58	0.2583
	距植草带的距离	103.71	<0.0001 *
	植草带×距植草带的距离	9.51	0.0011 *
步甲多度 Carabid abundance	植草带宽度	2.23	0.1637
	距植草带的距离	105.56	<0.0001 *
	植草带宽度×距植草带的距离	11.25	0.0005 *

2.3 植草带宽度与植被多样性对蜘蛛和步甲群落结构及分布的影响

Monte Carlo 检验结果显示,植草带宽度、植被 Margalef 指数对比邻玉米田内蜘蛛和步甲群落结构的影响均达到了显著水平,RDA 排序图前两轴共计解释了蜘蛛和步甲群落结构变异的 76.16%和 58.57%(图 5)。蜘蛛 RDA 排序前两轴特征根值之和为 0.7917,植草带的宽度和植被 Margalef 指数共解释前两轴解释率的 62.3%。RDA 排序图第一轴物种环境累积贡献率为 68.94%,Margalef 指数在第一轴有较高的正得分,Pielou 指数在第一轴有较高的负得分。第二轴物种累积贡献率为 7.23%,植草带的宽度、Shannon 指数、Simpson 指数、Pielou 指数在第二轴均有较高的负得分。步甲 RDA 排序前两轴特征根之和为 0.5857,植草带的宽度和植被 Margalef 指数共解释前两轴解释率的 50.0%。RDA 排序图第一轴物种环境累积贡献率为 37.16%,第二轴物种累积贡献率为 21.41%,植草带的宽度在第一轴有较高的正得分,植被 Shannon 指数、Simpson 指数、Margalef 指数和植草带的宽度在第二轴有较高的正得分,植被 Pielou 指数在第二轴均有较高的负得分。蜘蛛优势科狼蛛科(*Fa7*)分布于第一轴右侧,与植被 Margalef 指数呈正相关关系,常见的球蛛科(*Fa8*)、卷叶蛛科(*Fa4*)则主要出现在 6 m 植草带比邻的玉米田中。步甲优势种黄斑青步甲(*Sp.5*)分布于第一轴右侧,与植草带宽度呈正相关关系,常见的迅小步甲(*Sp.16*)、暗星步甲(*Sp.3*)、四斑小步甲(*Sp.15*)则与植草带的宽度呈正相关关系,主要分布在 6 m 植草带比邻的玉米田中。

2.4 植草带对比邻玉米田主要害虫发生的影响

以蜘蛛和步甲类群对玉米害虫的益害比来反映植草带涵养捕食性天敌对比邻玉米田主要害虫发生的调控作用(图 6)。4 m、6 m 植草带比邻的玉米田蜘蛛/害虫显著高于 2 m 植草带($F=58.82, P<0.0001$),不同宽度植草带与其对照条带之间蜘蛛/害虫益害比差异显著($F=77.51, P<0.0001$)。4 m、6 m 植草带比邻的玉米田步甲/害虫显著高于其对照条带比邻玉米田($F=41.22, P<0.0001$),且 6 m 植草带比邻的玉米田步甲/害虫益害比显著高于 2 m、4 m 植草带($F=79.00, P<0.0001$)。

单因子方差分析结果显示(表 4),玉米抽丝期,4 m、6 m 植草带比邻农田的受害株率($F=90.43, P<0.0001$)显著低于 2 m 植草带,其中 6 m 植草带比邻农田的受害株率($F=9.66, P=0.0001$)显著低于对照农田,随着调查样带距离增加,不同宽度植草带比邻农田的受害株率均显著减少,植草带比邻农田 1 m 处的受害

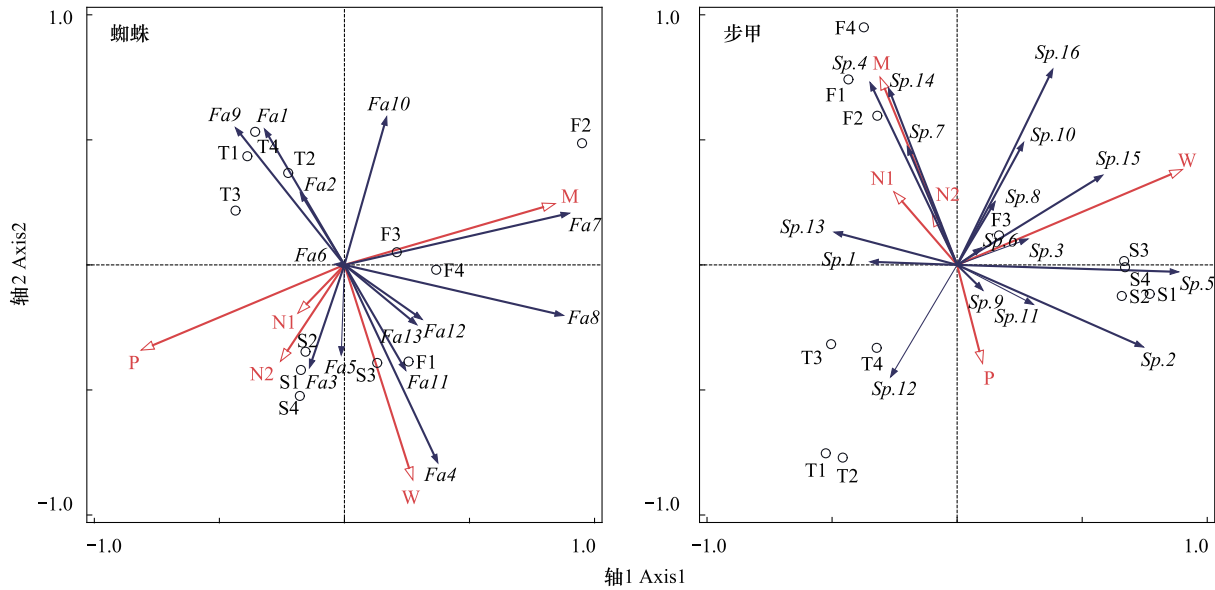


图5 蜘蛛、步甲群落结构与植草带植被群落特征的冗余分析

Fig.5 Redundance analysis (RDA) of spiders and carabids assemblages structure and grassy strips vegetation characteristics

W: 植草带的宽度 Grassy strip width; N1: 植被 Shannon 指数 The Shannon index of vegetation; N2: 植被 Simpson 指数 The Simpson index of vegetation; P: 植被 Pielou 指数 The Pielou index of vegetation; M: 植被 Margalef 指数 The Margalef index of vegetation; Fa1: 漏斗蛛科 Agelenidae; Fa2: 管巢蛛科 Clubionidae; Fa3: 卷叶蛛科 Dictynidae; Fa4: 平腹蛛科 Gnaphosidae; Fa5: 皿蛛科 Linyphiidae; Fa6: 狼蛛科 Lycosidae; Fa7: 类球蛛科 Nesticidae; Fa8: 跳蛛科 Salticidae; Fa9: 球蛛科 Theridiidae; Fa10: 蟹蛛科 Thomisidae; Sp. 1: 大暗黑步甲 *Amara gigantis*; Sp. 2: 普通暗黑步甲 *Amara plebeja*; Sp. 3: 暗星步甲 *Calosoma lugens*; Sp. 4: 麻青步甲 *Chlaenius junceus*; Sp. 5: 黄斑青步甲 *Chlaenius micans*; Sp. 6: 点沟青步甲 *Chlaenius praefactus*; Sp. 7: 螯步甲 *Dolichus halensis*; Sp. 8: 雕角小步甲 *Dyschirius glypturus*; Sp. 9: 淡鞘婪步甲 *Harpalus pallidipennis*; Sp. 10: 单齿婪步甲 *Harpalus simplicidens*; Sp. 11: 四斑扁须步甲 *Panagaeus davidi*; Sp. 12: 广屁步甲 *Pheropsophus occipitalis*; Sp. 13: 单齿婪步甲 *Scarites terricola*; Sp. 14: 四斑小步甲 *Tachys gradatus*; Sp. 15: 迅小步甲 *Tachys nanus*

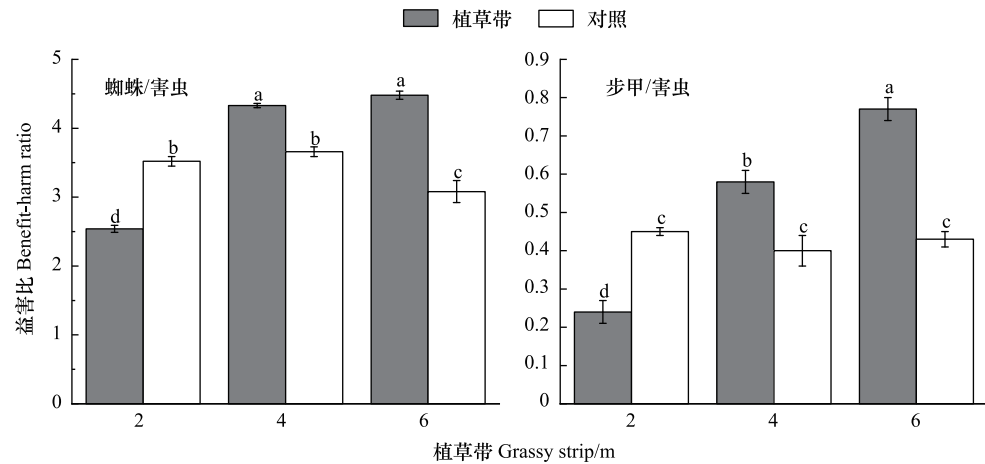


图6 植草带比邻玉米田的蜘蛛、步甲益害比

Fig.6 The benefit-harm ratio of spider and carabid of maize field adjacent to grassy strips

株率显著高于 10 m 处,对照农田 1 m、10 m 调查样带间无显著差异;灌浆期,4 m、6 m 植草带比邻农田的受害株率($F=80.96$, $P<0.0001$)显著低于 2 m 植草带,且 4 m、6 m 植草带比邻农田的受害株率均显著低于其对照农田($F=55.92$, $P<0.0001$),随着调查样带距离增加,2 m、6 m 植草带比邻农田 1 m 处的受害株率显著高于 10 m 处,对照农田 1 m、10 m 调查样带间无显著差异。

2.5 植草带对玉米产量的影响

由表 5 可知,植草带对比邻农田玉米籽粒的百粒重影响显著 ($F=28.90, P<0.0001$), 4 m、6 m 植草带较 2 m 植草带显著增加了玉米籽粒百粒重 ($F=34.51, P<0.0001$)。植草带对比邻农田玉米穗粒数和产量影响显著, 6 m 植草带的玉米穗粒数 ($F=47.69, P<0.0001$) 和产量 ($F=19.89, P=0.0005$) 显著高于 2 m、4 m 植草带, 4 m、6 m 植草带比邻农田的玉米穗粒数 ($F=42.83, P<0.0001$) 和产量 ($F=36.09, P<0.0001$) 较其对照显著增加。

表 4 植草带及其对照条带比邻玉米田主要害虫发生情况

Table 4 Pest occurrence of maize field adjacent to grassy and crop strips

调查时间 Time	处理 Treatment	调查距离 Distance/m	受害株率/% Hazard rate			害虫种类及虫数/头 Quantity and type				
			均值 Mean	F	P	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
抽丝期 Silking stage	TC	1	77.50	81.52	0.0001	41	4	1	2	954
		10	65.00			61	0	0	0	260
	FC	1	58.75	96.43	<0.0001	36	0	9	1	95
		10	47.50			33	0	0	0	10
	SC	1	58.75	37.88	0.0008	39	7	2	1	25
		10	46.25			33	0	0	1	0
	TCK	1	55.00	0	1.0000	31	7	0	0	47
		10	55.00			31	0	0	0	255
	FCK	1	55.00	0.31	0.5976	54	2	2	1	30
		10	53.50			25	0	1	0	3
	SCK	1	58.75	1.82	0.2260	53	9	0	3	0
		10	54.00			48	0	0	1	0
灌浆期 Filling stage	TC	1	52.50	63.46	0.0002	0	0	12	0	0
		10	38.75			2	0	0	0	0
	FC	1	38.75	0.63	0.4575	0	1	13	0	0
		10	37.50			1	0	0	6	0
	SC	1	35.00	13.64	0.0102	0	0	2	0	0
		10	30.00			1	0	0	4	0
	TCK	1	55.00	0.79	0.4085	0	8	6	0	50
		10	57.50			4	0	2	12	0
	FCK	1	60.00	2.14	0.1936	0	2	12	0	220
		10	62.50			2	0	0	0	0
	SCK	1	57.50	5.17	0.0633	0	2	0	0	0
		10	62.50			0	0	0	0	0

X₁: 棉铃虫 *Helicoverpa armigera*; X₂: 玉米螟 *Pyrausta nubilalis*; X₃: 桃蛀螟 *Dichocrocis punctiferalis*; X₄: 粘虫 *Mythimna separata*; X₅: 蚜虫 *Aphidoidea*

表 5 不同宽度植草带对玉米产量及构成要素的影响

Table 5 Effects of different widths of grassy strips on maize yield and constituent factors

处理 Treatment	百粒重 100-grain weight/g	穗粒数 Spike number	产量 Yield/ (kg/hm ²)	处理 Treatment	百粒重 100-grain weight/g	穗粒数 Spike number	产量 Yield/ (kg/hm ²)
TC	24.91±0.25b	508.13±9.01bc	10802.72±37.26b	TCK	23.39±0.46c	486.50±10.68c	10724.61±12.40b
FC	26.81±0.11a	513.13±7.13b	11209.90±21.02b	FCK	24.76±0.30b	459.75±9.65d	9845.42±26.98c
SC	27.41±0.27a	596.88±4.94a	13317.63±29.91a	SCK	21.82±0.67d	439.00±7.72d	9402.62±38.78c

同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 植草带对蜘蛛和步甲群落多样性的影响

植草带因避免了许多人为干扰,对农业生物多样性的维持具有重要作用,其中蜜源植物的花蜜/花粉是捕

食性节肢动物的食物来源^[24],同时为蜘蛛和步甲等天敌提供替代猎物、越冬场所和庇护所,支持天敌种群的持续存在^[25]。非作物生境的构型和面积直接影响农田生物多样性,植草带宽度越大,意味着可为天敌生物提供更多的食源和更大的栖息地。本研究中较宽的植草带中具有显著高的蜘蛛和步甲物种丰富度和多度,这一结果符合上述理论,Knapp 和 Rezac 的研究也得出蜘蛛的多度与非作物生境的面积大小成正比^[26]。此外,6 m 植草带比邻的玉米田中蜘蛛和步甲的 Alpha 多样性低于 4 m 植草带,4 m 植草带对天敌的涵养效应优于 6 m 植草带,不同宽度植草带中蜘蛛和步甲群落存在较高的异质性。对于蜘蛛类群,游猎型的狼蛛科在 4 m 植草带聚集,而结网型的类球蛛科、卷叶蛛科和皿蛛科在 6 m 植草带聚集。对于步甲类群,捕食性黄斑青步甲多在 6 m 植草带聚集,而兼食性的迅小步甲、四斑小步甲、单齿婪步甲和单齿蝼步甲则在 4 m、6 m 植草带均有分布。不同宽度植草带蜘蛛和步甲群落结构的差异可能是由物种食性和食源供给差异导致的地表捕食性功能群内部存在较为强烈的种间竞争^[27],6 m 植草带捕食性步甲类群占据了相应的生态位获得种间优势,从而抑制了同为地表捕食性天敌的蜘蛛类群。

3.2 植草带对蜘蛛和步甲迁移扩散的影响

本研究中植草带对蜘蛛和步甲的迁入迁出无显著影响,这可能是由于蜘蛛和步甲类群的实时移动并无特定规律和目的性^[28]。同时,蜘蛛不仅从地表迁移扩散,像皿蛛科便可通过气流在空中进行扩散^[29]。植草带为蜘蛛和步甲提供了躲避农田高强度干扰的避难所,支持捕食性天敌种群的存续,在害虫爆发期,植草带涵养的天敌种群通过溢出效应向农田扩散^[30]。本研究中,4 m 和 6 m 宽度植草带内蜘蛛多度显著高于比邻玉米田,具有向玉米田的溢出效应;而 2 m 植草带仅观测到植草带与比邻玉米田交界处具有较高的蜘蛛多度,无明显溢出效应。4 m 植草带的蜘蛛涵养效应优于 6 m 植草带,可能原因在于 6 m 植草带比邻的玉米田中,除优势科狼蛛科为地面捕食型功能类群外,类球蛛科、卷叶蛛科和皿蛛科等结网型功能类群也占有很大比重,因此通过地表陷阱法捕获的蜘蛛类群不能够完全代表结网型蜘蛛类群,而且结网型蜘蛛通过飞航扩散的方向具有明显的不确定性,扩散距离远大于 30 m^[31]。类似于蜘蛛类群,4 m 和 6 m 宽度植草带内步甲多度显著高于农田内部,具有向玉米田的溢出效应,植草带宽度和距离共同决定步甲的空间分布。这一结果的可能原因是长期集约化、景观破碎化的农田中存活的步甲常是适应性强的广布种,它们仅在农田环境恶劣或越冬时向非作物生境迁移^[17]。

3.3 植草带对比邻玉米田主要害虫发生和玉米产量的影响

植草带同时为天敌类群和害虫提供了食源和庇护所,因此靠近植草带的玉米受害株率高于远离植草带的区域,但随着植草带宽度增加,玉米受害株率显著减少,蜘蛛和步甲类群对害虫的控制潜力也越强。另一方面,用益害比表示天敌类群的控制潜力时,6 m 植草带比邻的玉米田蜘蛛和步甲的益害比显著高于 4 m 和 2 m 植草带比邻的玉米田益害比,植草带与对照条带间差异显著。然而,并非高天敌密度就意味着低害虫发生率^[32]。Lotka—Volterra 捕食者—猎物模型显示,害虫的数量也限制着天敌的密度^[33]。此外,不同天敌类群对害虫的调控作用也存在差异,捕食性天敌类群内部存在强烈的生态位竞争^[34]。因此,只有综合考虑天敌类群的多样性和益害比,才能准确反映不同宽度植草带的害虫调控作用^[35]。人工建植植草带能有效提高玉米产量,其本质是对农田害虫调控作用的响应。其中,6 m 植草带和 6 m 对照条带间玉米总产量的差异最为显著;随着植草带宽度的增加,玉米籽粒百粒重呈增加的趋势,4 m、6 m 植草带玉米籽粒百粒重和产量显著增加;植草带比邻农田玉米籽粒穗粒数和产量显著优于作物边界对照田。这些结果进一步证实了植草带通过影响比邻玉米田的生物控害功能,对害虫发生起到调控作用进而提高玉米产量。

4 结论与展望

作为最具推广价值的农田系统中的非作物生境,植草带对于比邻农田蜘蛛和步甲多样性的维持具有重要作用。植草带的面积比例会影响节肢动物群落的格局^[36],本研究中 4 m 植草带更有利于维持天敌多度,促进天敌群落的异质性,植草带宽度是影响步甲多度和群落分布的主要因素,尽管 4 m 植草带维持了相对于 6 m

植草带较低的步甲益害比,但却促进了游猎型蜘蛛类群的聚集,对于农田生物控害能力的调控具有重要影响。因此,在我国耕地紧张的国情下,综合考虑植草带耕地占用、天敌涵养和生物控害潜力等因素,确定 4 m 宽度植草带是具有推广价值的农田边界模式。由于非作物生境对农田生态系统的影响具有长期累积效应,未来我们仍将持续关注植草带宽度、非作物生境构型、比例等要素对农田生物多样性的影响,并加强植草带宽度对不同天敌类群的响应差异及协同效应研究。

参考文献 (References):

- [1] Norris K. Agriculture and biodiversity conservation: opportunity knocks. *Conservation Letters*, 2008, 1(1): 2-11.
- [2] Blary C, Kerbiriou C, Le Viol I, Barré K. Assessing the importance of field margins for bat species and communities in intensive agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107494.
- [3] Marshall E J P, Mooney A C. Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 89(1/2): 5-21.
- [4] Coutinho J G E, Angel-Coca C, Boscolo D, Viana B F. Heterogeneous agroecosystems support high diversity and abundance of trap-nesting bees and wasps among tropical crops. *Biotropica*, 2020, 52(5): 991-1004.
- [5] 李良涛. 农田边界和居民庭院植物多样性分布格局及植被营建[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [6] 谢坚, 屠乃美, 唐建军, 陈欣. 农田边界与生物多样性研究进展. *中国生态农业学报*, 2008, 16(2): 506-510.
- [7] Mkenda P A, Ndakidemi P A, Stevenson P C, Arnold S E J, Belmain S R, Chidege M, Gurr G M. Field margin vegetation in tropical African bean systems harbours diverse natural enemies for biological pest control in adjacent crops. *Sustainability*, 2019, 11(22): 6399.
- [8] Le Féon V, Poggio S L, Torretta J P, Bertrand C, Molina G A R, Burel F, Baudry J, Ghersa C M. Diversity and life-history traits of wild bees (Insecta: Hymenoptera) in intensive agricultural landscapes in the Rolling Pampa, Argentina. *Journal of Natural History*, 2016, 50(19/20): 1175-1196.
- [9] Montgomery I, Caruso T, Reid N. Hedgerows as ecosystems: service delivery, management, and restoration. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2020, 51(1): 81-102.
- [10] Christen B, Dalgaard T. Buffers for biomass production in temperate European agriculture: a review and synthesis on function, ecosystem services and implementation. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 55: 53-67.
- [11] Feng Y, Kravchuk O, Sandhu H, Wratten S D, Keller M A. The activities of generalist parasitoids can be segregated between crop and adjacent non-crop habitats. *Journal of Pest Science*, 2017, 90(1): 275-286.
- [12] Aavik T, Liira J. Quantifying the effect of organic farming, field boundary type and landscape structure on the vegetation of field boundaries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(3): 178-186.
- [13] Blaix C, Mooney A C. Structural field margin characteristics affect the functional traits of herbaceous vegetation. *PLoS One*, 2020, 15(9): e0238916.
- [14] 赵爽, 宋博, 丁圣彦, 侯笑云, 刘晓博, 汤茜, 王润. 黄河下游农业景观中景观结构和生境特征对林表生蜘蛛多样性的影响. *生态学报*, 2017, 37(6): 1816-1825.
- [15] De K, Siliwal M, Uniyal V P, Hussain S A. Spiders as bio-indicators of habitat disturbance in the riparian zone of the Ganga river: a preliminary study. *Tropical Ecology*, 2022, 63(2): 209-215.
- [16] 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.
- [17] Gallé R, Császár P, Makra T, Gallé-Szpisjak N, Ladányi Z, Torma A, Ingle K, Szilassi P. Small-scale agricultural landscapes promote spider and ground beetle densities by offering suitable overwintering sites. *Landscape Ecology*, 2018, 33(8): 1435-446.
- [18] 谷卫彬, 宇振荣, 刘因慧. 农田边界生物多样性与边界属性相互关系研究. *生态学杂志*, 2002, 21(3): 10-14.
- [19] 段美春, 覃如霞, 张宏斌, 陈宝雄, 金彬, 张松泊, 任少鹏, 金树权, 朱升海, 华家宁, 刘云慧, 宇振荣. 农田节肢动物不同取样方法的综合比较. *生物多样性*, 2021, 29(4): 477-487.
- [20] 张金屯. 数量生态学. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] Li W D, Xiang P. Statistical analysis (SAS/SPSS) on intervention research on intact classes. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2014, 85: 13.
- [22] Barve V, Otegui J. Bdviz: visualizing biodiversity data in R. *Bioinformatics*, 2016, 32(19): 3049-3050.
- [23] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

- [24] Lu Z X, Zhu P Y, Gurr G M, Zheng X S, Read D M Y, Heong K L, Yang Y J, Xu H X. Mechanisms for flowering plants to benefit arthropod natural enemies of insect pests: prospects for enhanced use in agriculture. *Insect Science*, 2014, 21(1): 1-12.
- [25] Qiu J X. Effects of landscape pattern on pollination, pest control, water quality, flood regulation, and cultural ecosystem services: a literature review and future research prospects. *Current Landscape Ecology Reports*, 2019, 4(4): 113-124.
- [26] Knapp M, Řezáč M. Even the smallest non-crop habitat islands could be beneficial: distribution of carabid beetles and spiders in agricultural landscape. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123052.
- [27] Reitz S R, Trumble J T. Competitive displacement among insects and arachnids. *Annual Review of Entomology*, 2002, 47: 435-465.
- [28] Schellhorn N A, Bianchi F J J A, Hsu C L. Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: links to pest suppression. *Annual Review of Entomology*, 2014, 59: 559-581.
- [29] Öberg S, Mayr S, Dauber J. Landscape effects on recolonisation patterns of spiders in arable fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 123(1/2/3): 211-218.
- [30] 赵紫华, 欧阳芳, 贺达汉. 农业景观中不同生境界面麦蚜天敌的边缘效应与溢出效应. *中国科学: 生命科学*, 2012, 42(10): 825-840.
- [31] Thomas C F G, Brain P, Jepson P C. Aerial activity of linyphiid spiders: modelling dispersal distances from meteorology and behaviour. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(5): 912-927.
- [32] 张旭珠, 张鑫, 宋潇, 宇振荣, 刘云慧. 植被边界带对相邻麦田地表步甲和蜘蛛分布及蚜虫发生的影响. *生态学报*, 2018, 38(23): 8442-8454.
- [33] Hening A, Nguyen D H. Stochastic Lotka-Volterra food chains. *Journal of Mathematical Biology*, 2018, 77(1): 135-163.
- [34] Martin E A, Reineking B, Seo B, Steffan-Dewenter I. Natural enemy interactions constrain pest control in complex agricultural landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(14): 5534-5539.
- [35] Martin E A, Seo B, Park C R, Reineking B, Steffan-Dewenter I. Scale-dependent effects of landscape composition and configuration on natural enemy diversity, crop herbivory, and yields. *Ecological Applications*, 2016, 26(2): 448-462.
- [36] Chaplin-Kramer R, Kremen C. Pest control experiments show benefits of complexity at landscape and local scales. *Ecological Applications*, 2012, 22(7): 1936-1948.