人工花草带对集约化玉米田内步甲多样性及其控害效能的影响

向子仪, 刘雨欣, 王慧, 杨殿林, 张海芳, 赵建宁, 张艳军

引用本文:
向子仪, 刘雨欣, 王慧, 等. 人工花草带对集约化玉米田内步甲多样性及其控害效能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3041–3052.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2025–0185

向子仪, 刘雨欣, 王慧, 等. 人工花草带对集约化玉米田内步甲多样性及其控害效能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3041-3052.
XIANG Z Y, LIU Y X, WANG H, et al. Effects of artificial flower and grass strips on carabid diversity and pest control in intensive maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3041-3052.

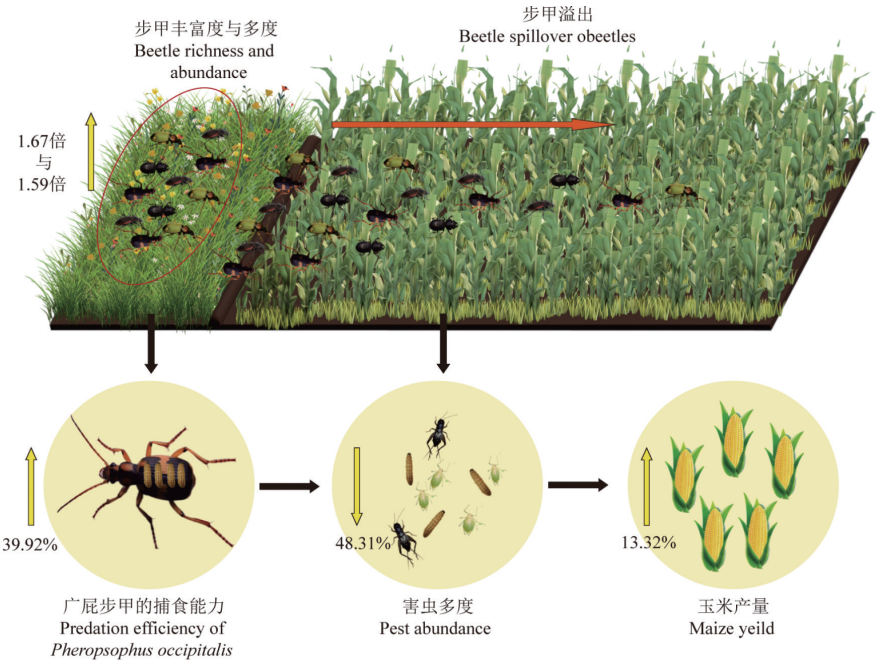
开放科学 OSID

人工花草带对集约化玉米田内步甲多样性及其控害效能的影响

向子仪[1,2], 刘雨欣[2], 王慧[2], 杨殿林[2], 张海芳[2], 赵建宁[1,2*], 张艳军[2*]

(1.东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2.农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘　要: 为探究高度集约化玉米种植系统中人工花草带保育地表步甲进而防控田内害虫的生态过程及效能,本研究选取华北典型玉米产区为研究区域,采用陷阱法监测人工花草带、毗邻玉米田及二者形成的交界处步甲群落的多样性,同时结合天敌捕食效能与爬行能力测试,比较了曾栖息于人工花草带与对照条带内的步甲的捕食能力与爬行速度的差异,探究人工花草带构建对集约化玉米种植系统内步甲多样性、迁移和捕食的影响,进而评估生态措施对玉米害虫防控与玉米产量的影响效果。结果表明:与种植玉米的对照条带相比,人工花草带可显著增加步甲的丰富度与多度,分别增加了1.67倍和1.59倍。人工花草带与玉米田形成的交界处步甲多度显著高于毗邻玉米田内距人工花草带10 m处,且步甲多度随取样距离的增加而递减,表现出溢出效应。与对照条带相比,人工花草带显著增加广屁步甲(*Pheropsophus occipitalis*)的捕食能力,平均增加了39.92%。最终,人工花草带显著降低了毗邻玉米田内总害虫种群数量(降低率为48.31%),并显著增加了玉米单位面积产量(增加率为13.32%)。研究表明,在集约化玉米田边种植人工花草带可保育步甲多样性,增强部分天敌步甲的捕食能力,减少玉米田害虫发生,促进玉米产量增加。本研究凸显了人工花草带在集约化粮田系统中保育天敌、促进生态防控害虫的潜力。



关键词: 非作物生境管理;生物多样性;天敌昆虫;生态调控;集约化粮田

中图分类号: S476　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2025)12-3041-12　　doi:10.11654/jaes.2025-0185

收稿日期: 2025-02-26　　**录用日期:** 2025-04-27

作者简介: 向子仪(2000—),女,贵州黔东南人,硕士研究生,从事生物多样性与生态农业研究。E-mail:xiangziyi0919@163.com
***通信作者:** 赵建宁　E-mail:zhaojianning@caas.cn; 张艳军　E-mail:zhangyanjun@caas.cn

基金项目: 天津市自然科学基金项目(24JCYBJC00640);国家自然科学基金项目(32271651);中国农业科学院科技创新工程(农业农村部环境保护科研监测所);面向可持续发展的中国农业生态系统创新性转型项目(GCP/CPR/065/GFF)

Project supported: Tianjin Natural Science Foundation(24JCYBJC00640); National Natural Science Foundation of China(32271651); Chinese Academy of Agricultural Sciences Innovation Program(Agro-Environmental Protection Institute); Innovative Transformation of China's Food Production Systems and Agro-ecological Landscapes towards Sustainability(GCP/CPR/065/GFF)

Effects of artificial flower and grass strips on carabid diversity and pest control in intensive maize fields

XIANG Ziyi[1,2], LIU Yuxin[2], WANG Hui[2], YANG Dianlin[2], ZHANG Haifang[2], ZHAO Jianning[1,2*], ZHANG Yanjun[2*]

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: To investigate the ecological processes and effectiveness of artificial flower strips in enhancing surface-dwelling beetle populations in highly intensified maize cropping systems. A typical maize production region in north China was selected for the study. Pitfall traps were used to monitor beetle community diversity in artificial flower and grass strips, adjacent maize fields, and the junction between the two. In addition, the predation efficiency and crawling ability of natural enemies were tested. The study compared the differences in predation efficiency and crawling speed of beetles that had inhabited artificial flower and grass strips and control strips. The effects of artificial flower and grass strip establishment on beetle diversity, migration, and predation effectiveness within intensive maize cropping systems were assessed, along with the impact of these ecological measures on pest control and maize yield. Compared with the control strips planted with maize, artificial flower and grass strips significantly increased beetle richness and abundance, with increases of 1.67 times and 1.59 times, respectively. The beetle abundance at the junction between the artificial flower and grass strip and maize field was significantly higher than that in the maize field 10 meters from the artificial flower and grass strip, and beetle abundance decreased with increasing distance from the artificial flower and grass strip, exhibiting an overflow effect. Compared to the control strip, artificial flower and grass strips significantly enhanced the predation efficiency of *P. occipitalis* beetles, with a 39.92% increase on average. Ultimately, artificial flower and grass strips significantly reduced total pest populations in adjacent maize fields by 48.31% and increased maize yield per unit area by 13.32%. Overall, The establishment of artificial flower and grass strips at the edges of intensive maize fields can conserve beetle biodiversity, enhance the predation capacity of certain beetle species, reduce pest occurrences, and improve maize yield. This study highlights the potential of artificial flower and grass strips in protecting natural enemies for ecological pest control in intensive cereal farming.

Keywords: non-crop habitat management; biodiversity; natural enemy insects; ecological regulation; intensive cereal farming

单一作物种植、农药化肥大量使用和高度集约化种植模式造成了农田景观破碎化、生物多样性锐减与病虫害频发等一系列环境问题[1]。农田生物多样性与农田生态系统服务功能息息相关,保护生物多样性可提高农田系统生态服务功能,进而达到作物的稳产、提质和减害效果[2]。非作物生境管理是保护农田生物多样性的主要途径[3-4]。非作物生境主要分为自然生长型、人工型与混合型,包括林地、草地、绿篱、野花带、野草带等类型[5-6]。恢复农田边界非作物生境对病虫害生物防治和作物授粉均有促进作用[7-9]。野花带或野草带具有比作物生境高的植物多样性,而高的植物多样性有助于保育天敌种群控制害虫的暴发[10-12],其原因在于农田生态系统中的野花带或野草带受人为干扰较小,相对作物生境更稳定的环境适宜为节肢动物提供食源地和避难场所等[13-15]。相反,减少野花带或野草带的植被多样性与覆盖度会引起有益节肢动物多样性下降等生态问题[16-17]。因此,在农田系统构建或恢复非作物植物带是维持生物多样性及提升农田系统生态功能的有效途径。

步甲属于鞘翅目(Coleoptera)步甲科(Carabidae),其中绝大部分物种为捕食性天敌,具有食性广、捕食能力强等特点[18-20],如黄斑青步甲(*Chlaenius micans*)一龄幼虫能捕食体型大自己几倍的鳞翅目幼虫[21]。大量研究表明,步甲是农田生物多样性组成中的指示性生物类群,其对农田害虫种群控制发挥着重要作用[22-23]。野花带或野草带作为节肢动物的食源地、栖息地和避难所,被公认为是步甲的物种资源储备库[24]。尤其在集约化种植模式下,农田系统中非作物生境稀缺,野花带或野草带可显著增加步甲的物种丰富度与多度[25-26]。不同于野花带或野草带,人工花草带应兼顾蜜源植物与栖境植物,其所要实现的生态功能具有较强的目的性,即保育有益节肢动物、控制农田害虫以实现减药和稳产。以往的研究偏重于探究自然/半自然花草带对节肢动物多样性保育与害虫调控的影响[27-30]。近年来,人工花草带的研究受到重视,如:芬兰集约化大麦田人工植草带(3 m宽,混种14种花草)增加了地表天敌(蜘蛛、步甲等)种群数量,增强了天敌捕食作用,从而抑制了麦蚜的种群数量[31];我国集约化玉米田人工花草带(2~6 m宽,16种花草)显著增加了玉米田内的蜘蛛、步甲数量,提高了益害比,增加了玉米产量[32]。但是天敌步甲的生活习性、扩散能力和作用方式等存在较大的种间差异[33],人工花草带所保育天敌步甲溢入毗邻农田调控害虫的生态过程仍不明晰,需收集证据以阐明这一科学问

题。本研究旨在探究人工花草带保育步甲多样性效能和步甲群落结构、步甲迁移及其捕食能力,明确人工花草带对玉米田害虫防控及玉米产量的影响,研究结果将丰富人工花草带增益控害的知识,为人工花草带在集约化粮田的构建及应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于山东省齐河县宋坊农场(36°38′17″N,116°34′39″E)。区域地处黄河下游的冲积平原,属于暖温带半湿润季风气候区,是我国重要的粮食主产区。土壤类型为潮土,土壤有机质含量为9.47 g·kg^{-1},全氮含量为1.44 g·kg^{-1},硝态氮含量为15.15 mg·kg^{-1},铵态氮含量为4.48 mg·kg^{-1},速效磷含量为16.10 mg·kg^{-1}。海拔20 m,年平均气温13.5 ℃,年平均降水量571.6 mm。种植制度为冬小麦和夏玉米轮作,夏玉米于6月中旬种植,10月上旬收获。玉米所用品种为登海605,播种密度为7.5×10^4~8.0×10^{4}株·hm^{-2}(行距50 cm,株距25 cm)。玉米田内施肥方式为:常规复合肥(N 18%、P_2O_5 18%、K_2O 18%)作基肥,施肥量600 kg·hm^{-2},尿素作追肥,施肥量为450 kg·hm^{-2}。玉米田内施药方式为:在玉米苗期施用氯虫苯甲酰胺悬浮剂(SC,有效成分20%),施用量为225 mL·hm^{-2};在大喇叭口期施用吡唑醚菌酯乳油(EC,有效成分25%),施用量为225 mL·hm^{-2}。3块玉米田内(人工花草带毗邻玉米田和对照条带毗邻玉米田)施肥施药等农事管理方式均保持一致。试验区的人工花草带于2019年10月完成种植。通过在本地植物的基础上引入一些功能植物,功能植物的混播比例(种子质量比)为:60%黑麦草*Lolium perenne* L.(禾本科),15%的紫花苜蓿*Medicago sativa* L.(豆科),5%的菊苣*Cichorium intybus* L.(菊科),5%的菊芋*Helianthus tuberosus* L.(菊科),5%的野豌豆*Vicia sepium* L.(豆科),5%的苦苣菜*Sonchus oleraceus* L.(菊科),5%的鼠尾草*Salvia japonica* Thunb.(唇形科)。3块花草带管理方式一致:均采用粗放管理的方式,不施用化肥和农药,每年根据生长情况修剪2~3次,并根据干旱情况进行浇水。

1.2 试验设计

选取3块独立的田块(长300 m,宽150 m)作为试验地,任意两块农田间距大于300 m,每一田块为一次重复。选取人工花草带(3块花草带均长100 m,宽4 m)为处理条带(T);选取同等宽度的种有玉米的条带(3块对照条带均长100 m,宽4 m)作为对照条带(C)。为保证取样的独立性,依据步甲的主要活动范围(<30 m)[34],处理条带与对照条带间隔大于100 m(图1)。在2023年8月和9月采用样方法[13]调查花草带植物组成,在花草带构建后近4 a,植物群落发生了演替且随季节变化,部分种植的功能植物消失,其调查结果见表1。2023年7—9月采用陷阱法在玉米大喇叭口期(7月30日—8月6日)、灌浆期(8月27日—9月3日)和完熟期(9月19日—9月26日)对节肢动物进行取样。分别在距交界处1 m的人工花草带与对照条带内(-1 m)、条带与玉米田的交界处(0 m)、距交界处1 m与10 m的玉米田内布置陷阱,每个距离的陷阱设8个平行,相邻平行陷阱间距离大于10 m,3个重复田块共布置192个陷阱(图1)。

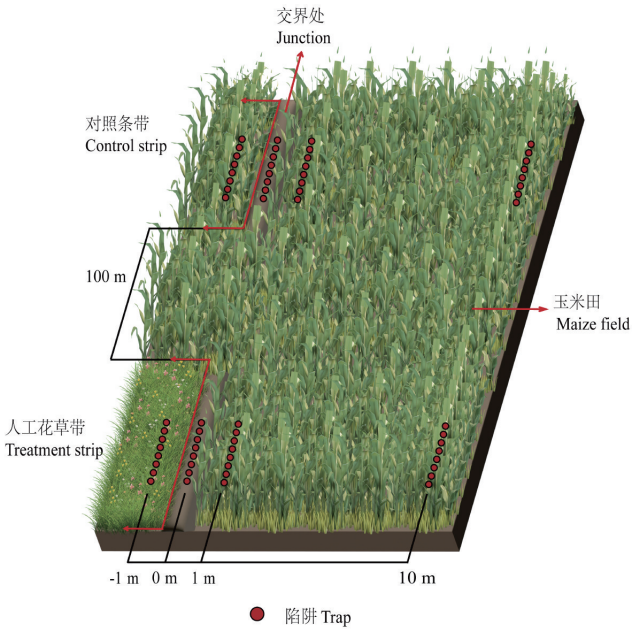


图1 陷阱布置

Figure 1 Trap layout

1.3 节肢动物取样与调查

采用陷阱法[35]对节肢动物进行取样,将上口径8.1 cm、下口径4.6 cm、高10.5 cm的塑料杯埋入土壤,杯口与地面齐平。在杯内倒入1/3容量的饱和食盐水与洗衣粉混合液,陷阱放置48 h后回收。每个距离的8个平行陷阱合并为一个样品保存在75%的酒精内并带回实验室鉴定,鉴定参考书目:《辽宁甲虫原色图鉴》《昆虫分类学》《天敌昆虫图鉴》《中国土壤动物检索图鉴》等。步甲鉴定到种,其他节肢动物鉴定到科。

2023年7—9月采用五点法[36]分别在玉米大喇叭口期(7月30日—8月6日)、灌浆期(8月27日—9月3

表1 人工花草带的植物组成

Table 1 Plant composition of artificial flower and grass strips

科 Families	物种 Species	盖度 Cover/%		
		花草带Ⅰ Flower and grass strip Ⅰ	花草带Ⅱ Flower and grass strip Ⅱ	花草带Ⅲ Flower and grass strip Ⅲ
菊科 Asteraceae	菊苣 *Cichorium intybus* L.(1)	7.50	13.25	11.75
	刺儿菜 *Cirsium arvense* Wimm. & Grab.(2)	6.50	7.58	4.33
	旋覆花 *Inula britannica* L.(2)	0.92	3.83	1.33
	米蒿 *Artemisia dalai-lamae* Krasch.(2)	0	1.00	0.25
	苦苣菜 *Sonchus oleraceus* L.(1)	6.67	7.00	4.75
	黄花蒿 *Artemisia annua* L.(2)	1.00	1.33	2.67
	菊芋 *Helianthus tuberosus* L.(1)	12.92	10.58	14.00
	小蓬草 *Erigeron canadensis* L.(2)	0.42	1.25	0.83
禾本科 Poaceae	狗尾草 *Setaria viridis* L.(2)	7.50	3.92	6.92
	黑麦草 *Lolium perenne* L.(1)	30.83	27.58	32.92
	芦苇 *Phragmites communis* L.(2)	3.42	3.08	3.75
苋科 Amaranthaceae	藜 *Chenopodium album* L.(2)	1.92	5.50	2.75
	地肤 *Kochia scoparia*(L.) Schrad.(2)	2.33	2.92	4.17
豆科 Fabaceae	紫花苜蓿 *Medicago sativa* L.(1)	32.50	35.42	37.08
大麻科 Cannabaceae	葎草 *Humulus scandens* Lour. Merr.(2)	3.75	2.25	1.50
锦葵科 Malvaceae	苘麻 *Abutilon theophrasti* Medicus.(2)	0.58	1.08	0.25
夹竹桃科 Apocynaceae	鹅绒藤 *Cynanchum chinense* R. Br.(2)	2.50	2.08	1.67

注:(1)功能植物;(2)本地植物。

Note:(1)Functional plants;(2)Native plants.

日)与完熟期(9月19日—9月26日)调查人工花草带和对照条带毗邻玉米田内的害虫发生情况。每点随机调查20株玉米,共调查100株;解剖玉米植株,记录玉米植株表面和内部鳞翅目、半翅目等玉米害虫成虫和幼虫的数量。

1.4 步甲捕食量与爬行能力测定

分别从人工花草带(T)和对照条带(C)内诱捕活步甲。选取捕食害虫为主的两种优势步甲——广屁步甲(*Pheropsophus occipitalis*)和黄斑青步甲(*C. micans*)作为研究对象[21,37],以玉米螟幼虫作为猎物,在光周期16L∶8D、温度(25±1)℃、相对湿度65%±5%的室内条件下进行试验。方法参照Mouratidis等[38]的研究,试验容器稍作改动,同时为减少步甲个体年龄差异带来的影响,本研究增加测试虫数至每个处理30头。具体操作步骤如下:在圆形塑料盒(直径15 cm,高度3 cm)内垫入一张浸湿的无菌滤纸用作保湿,每盒分别放入3龄与5龄玉米螟幼虫若干,并接入一只饥饿了24 h的步甲成虫,3龄与5龄玉米螟幼虫密度分别设置为每盒50头和10头。每只步甲测定一次,每组处理(T和C)均设置30次重复(每个重复1只步甲),并分别设置一组只有玉米螟幼虫而无步甲的空白对照,24 h后记录玉米螟幼虫的死亡数量,并以自然死亡率校正。

步甲爬行能力的强弱是影响其扩散并控制害虫的重要因素[39]。完成捕食量测定后继续测定其爬行能力。参照王玉雪等[40]的方法测试步甲的爬行速度,采用硬卡纸与纸箱自制的无盖方盒(长100 cm,宽3 cm,高7 cm)作为爬行能力试验装置,在方盒底部铺入2 cm厚湿土并压实。分别将两种步甲成虫(广屁步甲和黄斑青步甲)放入方盒一端观察记录其爬行到另一端所用时间。每种步甲每组处理(T和C)各30只。爬行能力测定所用步甲与捕食量测定试验的相同。

1.5 玉米产量测定

采用平行线法[35]测定玉米产量。玉米蜡熟后,分别在玉米田内距人工花草带1 m与10 m处选取两行相邻的玉米,在两行中随机选取相邻的40株(20株·行$^{-1}$),收获40株上全部的玉米穗,带回实验室脱粒和风干后记录穗粒数与百粒质量,同时,测量其株距与行距,并据此计算玉米的理论产量。

1.6 数据分析

采用非度量多维尺度分析(NMDS)与置换多元方差分析(PERMANOVA)在R4.4.2中的vegan包、gg-

plot2包和pairwise.adonis包中基于Bray-Curtis距离矩阵对步甲群落结构差异性进行分析,压力指数小于0.2时结果具有可靠性。步甲的α多样性指数以物种丰富度、多度、Shannon-Weiner多样性指数和Pielou均匀度指数评估,采用Past计算。

通过单因素方差分析(One-way ANOVA)和Fisher保护下的多重比较(LSD法)探究人工花草带对步甲多样性的影响和不同取样距离下步甲的丰富度和多度变化,同时结合一般线性回归,以有无人工花草带和不同取样距离作为固定效应变量,步甲丰富度与多度作为响应变量,分析步甲的溢出效应。步甲捕食量、步甲爬行速度、害虫多度、步甲与总害虫的数量比(益害比)和产量及其构成要素均采用独立样本t检验进行差异性分析。通过Pearson相关性检验法分析步甲多度、害虫多度、益害比和产量之间的相关性,探究种植人工花草带是否有利于玉米产量的提升。方差分析前采用Shapiro-Wilk和Levene检验法分别对数据集进行正态性与方差齐性检验,其中,步甲的益害比数据集经检测不符合正态分布,采用对数转换使其符合正态分布后进行分析。试验数据采用DPSv7.05分析,然后用Origin 2021作图。

2 结果与分析

2.1 步甲的群落组成

本研究共采集到595只步甲(表2),分属于15个种。优势种为黄斑青步甲(*C. micans*)、广屁步甲(*P. occipitalis*)和毛婪步甲(*Harpalus griseus*),分别占捕获步甲个体总数的29.75%、27.90%和27.90%;常见种包括蠋步甲(*Dolichus halensis*)和大暗黑步甲(*Amara gigantus*),分别占捕获步甲个体总数3.53%和3.36%。人工花草带内捕获步甲150只,属13种,占捕获步甲个体总数的25.21%;对照条带捕获58只,属5种,占捕获步甲个体总数的9.75%;人工花草带与玉米田交界处捕获116只,属9种,占捕获步甲个体总数的19.50%;对照条带与玉米田交界处捕获53只,属6种,占捕获步甲个体总数的8.91%;人工花草带毗邻玉米田内部捕获127只,属10种,占捕获步甲个体总数的21.34%;对照条带毗邻玉米田内部捕获91只,属6种,占捕获步甲个体总数的15.29%。

2.2 人工花草带对步甲多样性的影响

单因素方差分析和多重比较结果显示(图2),人工花草带对步甲的丰富度(F=16.925,df=3,P<0.01)与多度(F=10.358,df=3,P<0.01)影响极显著,对步甲的Shannon指数(F=2.478,df=3,P=0.136)与均匀度指数(F=2.011,df=3,P=0.191)影响不显著。人工花草带内步甲丰富度与多度均显著高于对照条带(分别增加了1.67倍和1.59倍)与对照条带毗邻玉米田,且人工花草带毗邻玉米田内步甲丰富度和多度均稍高于对照条带毗邻玉米田。NMDS分析与置换多元方差分析结果显示(图3),人工花草带对步甲的群落结构无显著影响(F=1.901,df=3,P=0.063);但与对照条带(F=3.770,df=1,P=0.300)和对照条带毗邻玉米田(F=3.839,df=1,P=0.300)相比,人工花草带与其毗邻玉米田(F=0.535,df=1,P=0.600)内步甲群落结构的相似度更高。

表2 条带、交界处和毗邻玉米田内步甲群落组成

Table 2 Community composition of carabids in different strips, junctions and adjacent maize fields

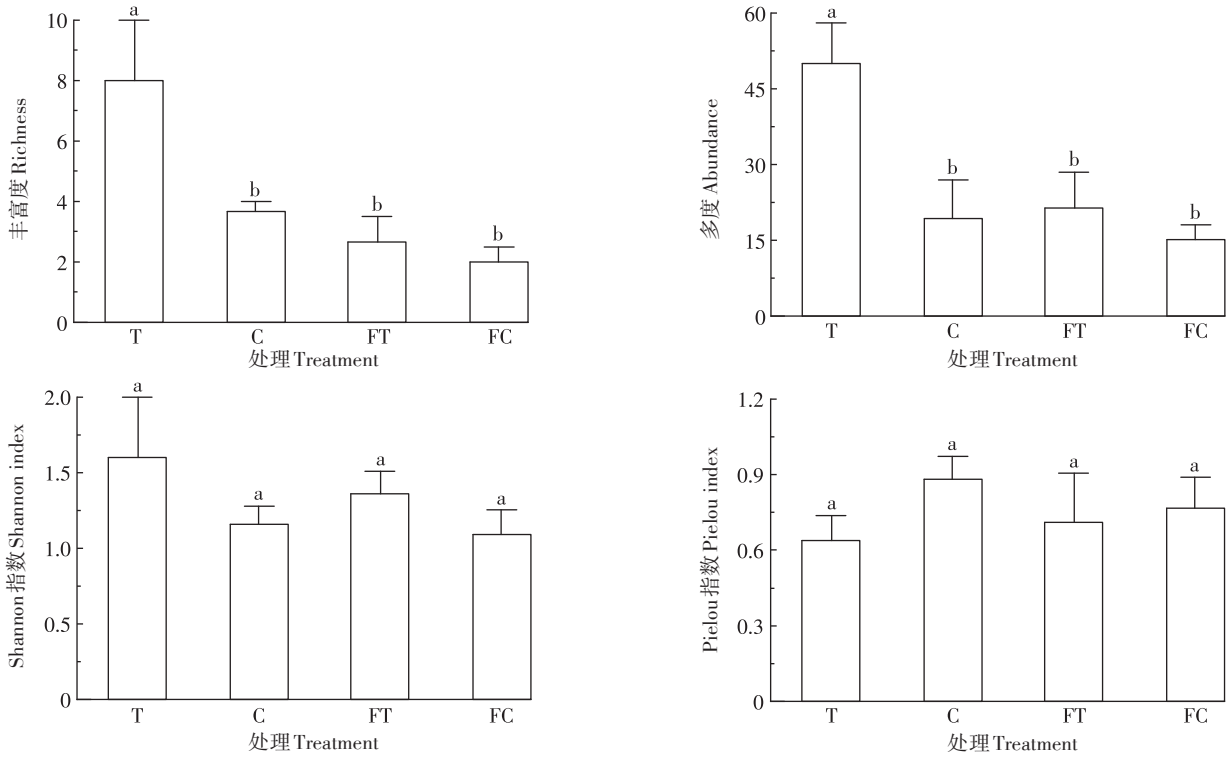
种Species	多度Abundance					
	T	C	JT	JC	FT	FC
普通暗黑步甲 *Amara plebeja*	0	0	0	0	0	1
淡鞘婪步甲 *Harpalus pallidipennis*	2	0	0	0	0	0
大暗黑步甲 *A. gigantus*	11	0	3	1	5	0
四斑小步甲 *Tachys gradatus*	4	0	4	0	1	0
广屁步甲 *P. occipitalis*	25	24	38	17	29	33
雕角小步甲 *Dyschirius glypturus*	2	0	0	0	0	0
黄斑青步甲 *C. micans*	31	18	18	15	52	43
拟暗黑步甲 *Amara chalcites*	2	0	0	0	1	0
毛婪步甲 *H. griseus*	57	13	36	17	32	11
蠋步甲 *D. halensis*	5	2	8	1	4	1
单齿蝼步甲 *Scarites terricola*	3	0	4	0	1	0
卵大背暗黑步甲 *Amara macronota*	2	0	0	0	1	0
黑足婪步甲 *Harpalus roninus*	2	0	2	0	1	0
毛盆步甲 *Lachnolebia cribricollis*	0	1	0	0	0	2
迅小步甲 *Tachyta nanus*	4	0	3	2	0	0
合计Total	150	58	116	53	127	91

注:T为人工花草带;C为对照条带;JT为人工花草带与玉米田交界处;JC为对照条带与玉米田交界处;FT为人工花草带毗邻玉米田(1 m与10 m的总和);FC为对照条带毗邻玉米田(1 m与10 m的总和)。

Note: T, Treatment strips; C, Control strips; JT, The junction of treatment strips and maize fields; JC, The junction of control strips and maize fields; FT, Maize fields adjacent to treatment strips (the sum of 1 m and 10 m); FC, Maize fields adjacent to control strips (the sum of 1 m and 10 m).

2.3 人工花草带对步甲溢出效应的影响

通过毗邻农田内步甲丰富度和多度随距交界处距离增加的变化来探究人工花草带对步甲溢出效应的影响。结果显示(表3),步甲丰富度与多度均受人工花草带种植与取样距离的显著影响。具体结果(图4):在人工花草带种植下,条带内部步甲丰富度和多度



T：人工花草带；C：对照条带；FT：人工花草带毗邻玉米田（1 m与10 m的均值）；FC：对照条带毗邻玉米田（1 m与10 m的均值）。不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

T: Treatment strips; C: Control strips; FT: Maize fields adjacent to treatment strips (the mean value of 1 m and 10 m); FC: Maize fields adjacent to control strips (the mean value of 1 m and 10 m). The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图2 条带及其毗邻玉米田内步甲多样性的差异

Figure 2 Differences in the carbid diversity of strips and adjacent maize fields

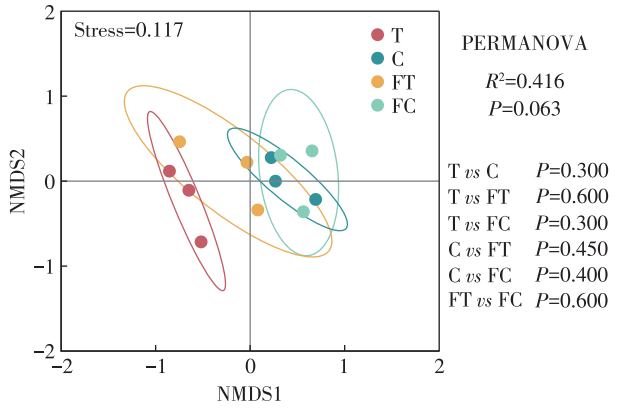


图3 条带及其毗邻玉米田内步甲群落的非度量多维度分析及置换多元方差分析

Figure 3 Nonmetric multidimensional analysis (NMDS) and Permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA) of carabids in strips and adjacent maize fields

均显著高于毗邻玉米田内距人工花草带1 m和10 m处，交界处的步甲多度也显著高于毗邻玉米田内距人工花草带10 m处，且步甲多度随取样距离的增加而递减；在没有人工花草带种植下，条带内部步甲丰富度和多度与毗邻玉米田内距对照条带1 m与10 m处无显著差异，未呈现随取样距离的增加而递减趋势。

表3 人工花草带与取样距离对步甲丰富度和多度的影响

Table 3 Effects of treatment strip presence and sampling distance on carabid richness and abundance

响应变量 Response variable	自变量 Independent variable	F值 F-value	P值 P-value
丰富度	有无人工花草带	19.882	<0.001***
	取样距离	5.255	0.010*
	有无人工花草带×取样距离	3.020	0.060
多度	有无人工花草带	21.531	<0.001***
	取样距离	5.473	0.009**
	有无人工花草带×取样距离	3.256	0.049*

注：***表示在0.001水平上显著；**表示在0.01水平上显著；*表示在0.05水平上显著。下同。取样距离梯度为：-1 m（条带内距交界1 m处）、0 m（交界处）、1 m（玉米田内距交界1 m处）、10 m（玉米田内距交界10 m处）。

Note: *** mean the significant at the 0.001 level; ** mean the significant at the 0.01 level; * mean the significant at the 0.05 level. The same below. Sampling distance gradient: -1 m (1 m from the junction in the strips); 0 m (junction); 1 m (1 m from the junction in the maize fields); 10 m (10 m from the junction in the maize fields).

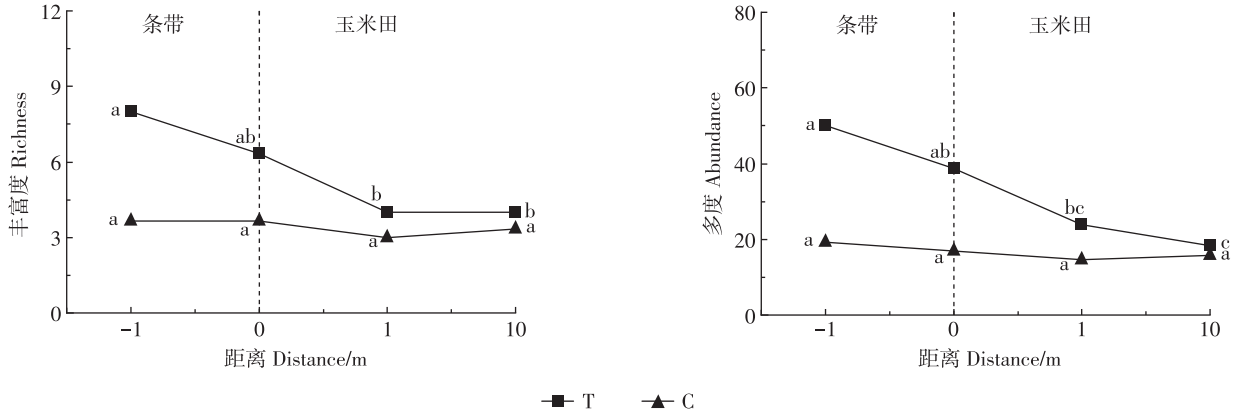


图4 随取样距离增加步甲丰富度和多度的变化

Figure 4 Changes of carabid richness and abundance with increase of sampling distance

2.4 人工花草带对优势种步甲捕食效能与爬行能力的影响

独立样本t检验分析结果(表4)显示,栖息于人工花草带内的广屁步甲对5龄(t=2.379,P<0.05)与3龄(t=6.949,P<0.001)玉米螟幼虫的捕食量均显著高于栖息于对照条带内的广屁步甲(平均增加了39.92%),而栖息于人工花草带内的黄斑青步甲对5龄(t=1.318,P=0.193)与3龄(t=0.921,P=0.361)玉米螟幼虫的捕食量均与对照条带无显著差异。独立样本t检验分析结果(图5)显示,人工花草带对广屁步甲(t=1.955,P=0.055)和黄斑青步甲(t=0.042,P=0.967)的爬行速度均无显著影响。

2.5 人工花草带对毗邻玉米田害虫防效的影响

玉米田内共捕获5目9科害虫(表5),优势科为蚜科(Aphididae)、螟蛾科(Pyralidae)和蟋蟀科(Gryllidae)。根据独立样本t检验可知,人工花草带毗邻玉米田内的蚜科(t=−3.886,P<0.05)、螟蛾科(t=−4.700,P<0.01)、飞虱科(t=−5.422,P<0.01)、蓟马科(t=−5.196,P<0.01)与总害虫多度(t=−4.577,P<0.05)显著低于对照条带毗邻玉米田,且人工花草带毗邻玉米田籽粒单位面积产量(t=3.154,P<0.05)和穗粒数(t=9.435,P<0.01)显著高于对照条带毗邻玉米田(图6)。但是人工花草带毗邻玉米田与对照条带毗邻玉米田的益害比(t=2.045,P=0.110)和玉米籽粒的百粒质量(t=2.023,P=0.113)差异不显著。Pearson相关性分析(图7)表明,毗邻玉米田内步甲多度与益害比呈极显著正相关关系(r=0.928,P<0.01),与害虫多度呈负相关关系,但相关性未达到显著水平(r=−0.608,P=0.200)。玉米产量与益害比呈显著正相关关系(r=0.826,P<0.05),与害虫多度呈显著负相关关系(r= −0.874,P<0.05),与步甲多度呈正相关关系但相关性未达显著水平(r=0.645,P=0.166)。

表4 人工花草带对优势种步甲捕食量的影响

Table 4 Effects of treatment strips on predation by dominant species of carabids

种 Species	玉米螟龄期 Instar of *O. furnacalis*	处理 Treatment	捕食量/头 Predation/head		
			均值 Mean	t值 t-value	P值 P-value
广屁步甲 *P. occipitalis*	5	T	2.80±0.21	2.379	0.021*
		C	2.07±0.23		
	3	T	24.30±0.88	6.949	<0.001***
		C	16.83±0.62		
黄斑青步甲 *C. micans*	5	T	5.83±0.17	1.318	0.193
		C	5.50±0.18		
	3	T	34.73±0.39	0.921	0.361
		C	34.13±0.53		

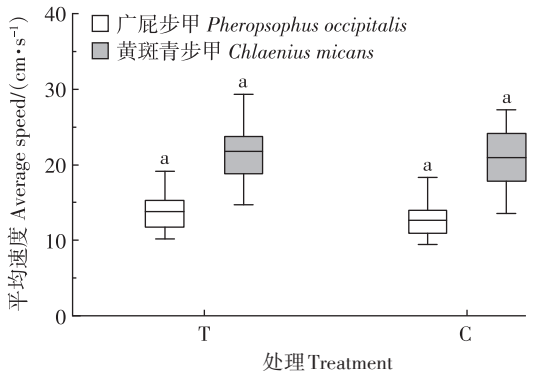


图5 草带对优势种步甲爬行能力的影响

Figure 5 Effects of treatment strips on the crawling capacity of the dominant species carabids

3 讨论

步甲作为农田生态系统中重要的捕食类天敌,其

表5 条带毗邻玉米田内害虫组成与多度差异

Table 5 difference in composition and abundance of pests in maize fields adjacent to strips

目 Order	科 Family	多度均值 Mean abundance		t值 t-value	P值 P-value
		FT	FC		
半翅目 Hemiptera	蚜科 Aphididae	368.67±31.69	769.33±98.12	−3.886	0.018*
	飞虱科 Delphacidae	3.00±0.56	10.00±1.00	−5.422	0.006**
	土蝽科 Cydnidae	2.33±1.20	3.33±1.45	−0.530	0.624
	叶蝉科 Cicadellidae	4.33±0.88	12.67±3.28	−2.451	0.070
直翅目 Orthoptera	蟋蟀科 Gryllidae	75.00±14.73	121.33±15.30	−2.181	0.095
	蝼蛄科 Gryllotalpidae	6.67±3.84	20.33±6.57	−1.796	0.147
鞘翅目 Coleoptera	鳃金龟科 Melolonthidae	3.00±1.73	8.67±2.85	−1.700	0.164
鳞翅目 Lepidoptera	螟蛾科 Pyralidae	153.33±9.84	240.67±15.76	−4.700	0.009**
缨翅目 Thysanoptera	蓟马科 Thripidae	0	6.00±1.16	−5.196	0.007**
合计 Total		616.33±43.59	1 192.33±118.05	−4.577	0.010*

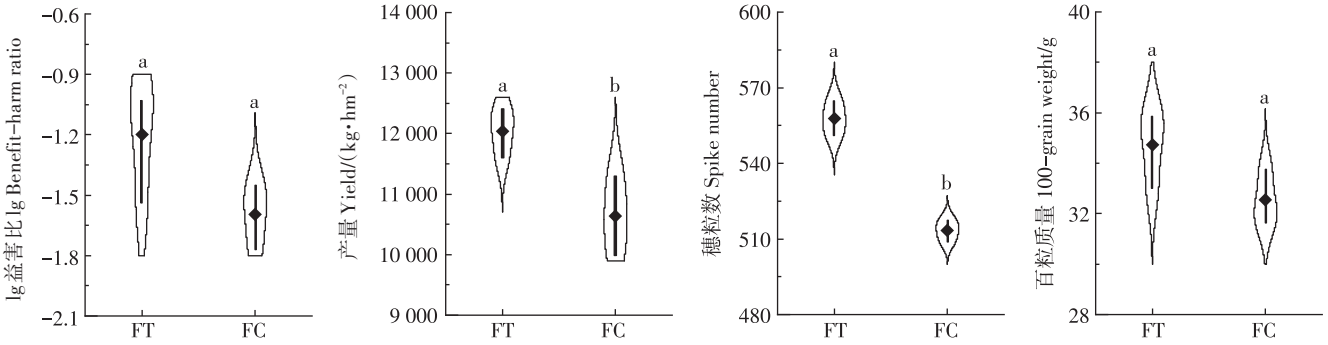


图6 条带毗邻玉米田内益害比、玉米产量及构成要素

Figure 6 Benefit-harm ratio, yield and yield components in maize fields adjacent to strips

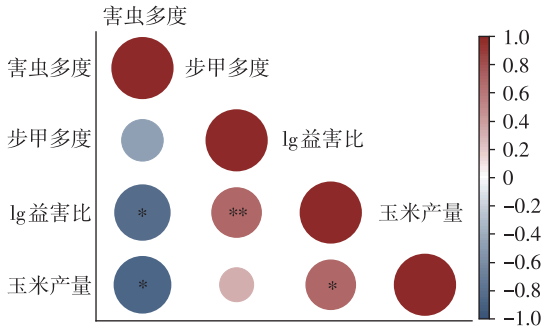


图7 不同处理玉米田内步甲、害虫与产量的Pearson相关性

Figure 7 The Pearson correlation of carabids, pests, and yield in maize fields adjacent to strips

物种丰富度与多度会受食物供应与栖息生境特性的影响[30]。较高的植物多样性有利于增加步甲的物种丰富度与多度[41-42]。本研究发现人工花草带内步甲13种，物种丰富度稍低于黄兰媚等[32]研究中的14种，但明显不同的是，本试验中毛婪步甲、黄斑青步甲和广屁步甲为优势种，而其试验中黄斑青步甲和单齿婪步甲为优势种。步甲优势种组成差异可能与人工花草带植被差异有关，与黄兰媚等[32]试验中的人工花草带的植物组成相比，本研究的人工花草带植物组成明显不同，尤其表现在豆科植物较少。此外，也可能与取样时期不同有关，因为不同种类步甲的多度会随着植物的生长而交替变化[43]。本研究发现毛婪步甲在人工花草带内占主要的优势地位，而广屁步甲和黄斑青步甲主要分布于玉米田内，这可能与毛婪步甲主要以杂草种子为食有关[44]，人工花草带内丰富的植物多样性可为毛婪步甲提供充足多样的食源[45]；广屁步甲和黄斑青步甲以捕食节肢动物为食[21,37]，种植玉米的对照条带与玉米田内的害虫可作为捕食性步甲的猎物。食性差异造成优势种步甲物种分布不同可能是人工花草带和对照条带内步甲群落结构差异的主要原因。

本研究发现，与玉米田内距人工花草带1 m与10 m处相比，人工花草带与玉米田形成的交界处维持着更高的步甲丰富度和多度，这一结果的原因在

于:交界处作为两类生境的过渡带,不同生境的交汇使得资源和能量的流动较为活跃,具有较高的生态复杂性及生物多样性,能促使步甲类群向交界处聚集[46-47]。本研究还发现步甲具有溢出效应(即步甲从人工花草带越过交界处向农田内部扩散),这是由于步甲具有一定的迁移和扩散习性[18-19],人工花草带所保育的步甲通过交界处向玉米田内扩散,步甲的溢出效应对玉米害虫防控具有重要的作用。与人工花草带不同,种植玉米的对照条带与玉米田同样也存在物理界面,但是步甲丰富度和多度未表现出随取样距离增加而递减的现象。此外,本研究中人工花草带与其毗邻玉米田内步甲群落相似性高于人工花草带和对照条带及对照条带毗邻玉米田,这应该是人工花草带与其毗邻玉米田内步甲相互迁移交流的结果[48]。

不同步甲的运动能力差异较大[49]。在本研究中,玉米田的两种优势种天敌步甲为黄斑青步甲和广屁步甲,黄斑青步甲的运动能力和捕食能力俱佳,而广屁步甲的运动能力和捕食能力均弱于黄斑青步甲。黄斑青步甲较强的运动能力可以使该天敌物种在人工花草带和毗邻玉米田之间快速转移,其优异的捕食能力并未得到人工花草带的促进。有趣的是,人工花草带显著增加了广屁步甲的捕食能力。非作物生境少受人类活动的干扰,有利于天敌的繁衍生息[10],如前文所述,人工花草带保育了较高的步甲丰富度和多度。同时,步甲具有溢出效应,其在玉米田捕食害虫,发挥生物防治功能。但是,玉米田面临人为活动频繁干扰(如施肥、施药、灌溉等),恶化的生存环境致使步甲的免疫功能下降,疾病感染率增加[50-51]。据此推测:广屁步甲运动能力与捕食能力相对较弱,对照条带的不良生存环境易对广屁步甲的健康状况产生影响,进而影响其捕食能力,人工花草带的保育效果得以体现;而对于黄斑青步甲来说,其较强的运动能力和捕食能力可能利于其克服或逃避对照条带的不良影响,人工花草带的保育效果难以显现。本研究中人工花草带对两种步甲捕食能力影响的结果较为初步,差异产生的内在机制有待后续进一步研究。

本研究结果表明,人工花草带的种植有效减少了毗邻玉米田内48.31%的害虫种群数量,同时提升了作物单位面积产量13.32%,本研究中害虫防治效率稍低于Tschumi等[52]报道的66%;但作物增产率稍优于报道的10%。上述差异的产生可能是由于不同类型作物产量形成及病虫危害差异造成的,有研究报道小麦具有较强产量补偿机制[53],一定阈值内的害虫危害对其产量的影响有限。如前文所述,人工花草带可保育更高步甲多度,且步甲表现出了溢出效应,理论上应该进入毗邻农田从而增加步甲益害比。但是,人工花草带毗邻玉米田的步甲益害比与对照条带毗邻玉米田无显著差异,这与预想的结果不一致。分析可能的原因,一方面害虫群落增长时间通常早于天敌群落[54],对照条带毗邻玉米田内较早出现较高的害虫密度促进了步甲多度增加;另一方面,人工花草带与玉米田形成的交界处维持着较高的步甲多度,这种界面效应弱化了步甲的溢出效应,导致步甲向毗邻玉米田内迁移的程度有限[34]。为探讨人工花草带调控作物产量的生态过程,本研究通过相关性分析发现,玉米田内害虫减少和步甲益害比增加均能显著促进玉米增产,但步甲多度和玉米产量的相关性不显著。这一结果可能是由于玉米田内除步甲外还存在着多种捕食性和寄生性天敌(蜘蛛、隐翅虫、寄生蜂等),害虫种群减少、玉米产量增加是农田内多种天敌协同作用的结果,其中步甲种群数量的增加是害虫防控和产量提高的部分贡献因素。此外,在步甲多度一定的情况下,人工花草带毗邻玉米田内的部分天敌步甲因人工花草带种植提升了其对玉米害虫的捕食能力,害虫种群减少,从而促进玉米增产。因此,较高天敌密度不一定能降低害虫发生率,较低天敌密度也不一定导致较高的害虫发生率。在研究农田边界的生态服务功能时,不能只关注天敌的多度,需要综合考虑天敌的多样性、溢出效应、益害比和捕食能力,从而全面评估非作物生境对天敌的保育功能及其对毗邻农田的控害作用。

本研究证实了在集约化玉米田边种植人工花草带可以保育步甲的多样性和增强某些天敌步甲的捕食能力,进而减少玉米害虫发生并实现玉米增产。通过人工花草带保育步甲调控农田害虫时,在不挤占耕地的前提下,需要在农田系统内将人工花草带构建为网络以增强非作物生境的连通性,为步甲提供更适宜的生存空间,更好地发挥其控害能力。此外,人工花草带必须与农田系统中其他的生态景观元素相协同,如防护林、树篱、沟渠等。同时,农田系统中害虫防控是天敌类群集体作用(天敌对害虫的捕食/寄生、天敌间的捕食/寄生等)的结果,不同天敌类群对非作物生境植被组成及物理结构的响应存在明显差异。在未来,对非作物生境管理的研究需要兼顾其他天敌类群的生存需求,筛选和验证更多的功能植物,通过食物网构建分析营养级联效应,不断优化蜜源植物与栖境

植物的组合。

4 结论

（1）与对照条带相比，人工花草带的种植能够显著增加步甲的丰富度与多度，对步甲表现出良好的保育作用。

（2）人工花草带内步甲丰富度和多度显著高于毗邻玉米田内距人工花草带1 m和10 m处，且步甲多度随取样距离的增加而递减，表现出溢出效应。

（3）人工花草带显著增强了广屁步甲（*P. occipitalis*）的捕食能力。

（4）与对照条带毗邻玉米田相比，人工花草带的种植显著减少了毗邻玉米田内害虫种群数量，并显著增加了玉米单位面积产量，充分显现出人工花草带在农田生态强化中的应用价值。

参考文献：

[1] SHI X Y, XIAO H J, LUO S D, et al. Can landscape level semi-natural habitat compensate for pollinator biodiversity loss due to farmland consolidation?[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107519.

[2] BIRKHOFER K, ANDERSSON G K S, BENGTSSON J, et al. Relationships between multiple biodiversity components and ecosystem services along a landscape complexity gradient[J]. *Biological Conservation*, 2018, 218: 247-253.

[3] 何北辰, 闫雪影, 刘雨欣, 等. 非作物生境及其中功能植物生态调控作物害虫的研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2025, 41(2): 501-510. HE B C, YAN X Y, LIU Y X, et al. Research progress on ecological regulation of crop pests in non-crop habitats and functional plants[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2025, 41(2): 501-510.

[4] HOLLAND J M, BIANCHI F J, ENTLING M H, et al. Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies[J]. *Pest Management Science*, 2016, 72(9): 1638-1651.

[5] VICKERY J, CARTER N, FULLER R J. The potential value of managed cereal field margins as foraging habitats for farmland birds in the UK[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 89(1/2): 41-52.

[6] 张艳军, 杨殿林, 王慧, 等. 基于农田生境管理的农作物害虫生态防控研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 997-1003. ZHANG Y J, YANG D L, WANG H, et al. Research advances on ecological pest control of agricultural crops based on farmland habitat management[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(5): 997-1003.

[7] KNAPP M, MARTIN Š, VENTURO A, et al. Importance of grassy and forest non-crop habitat islands for overwintering of ground-dwelling arthropods in agricultural landscapes: a multi-taxa approach[J]. *Biological Conservation*, 2022, 275: 109757.

[8] HOLLAND J M, DOUMA J C, CROWLEY L, et al. Semi-natural habitats support biological control, pollination and soil conservation in Europe. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(4): 31.

[9] YANG Q F, LI Z, OUYANG F, et al. Flower strips promote natural enemies, provide efficient aphid biocontrol, and reduce insecticide requirement in cotton crops[J]. *Entomologia Generalis*, 2023, 43(2): 421-432.

[10] 孟璇, 李佳宁, 范顺祥, 等. 农田边界和有机生产对稻田节肢动物天敌和害虫多样性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(12): 1963-1975. MENG X, LI J N, FAN S X, et al. Impacts of field margins and organic practices on arthropod natural enemy and pest diversities in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(12): 1963-1975.

[11] MATEOS-FIERRO Z, FOUNTAIN M T, GARRATT M P D, et al. Active management of wildflower strips in commercial sweet cherry orchards enhances natural enemies and pest regulation services[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 317: 107485.

[12] DASSOU A G, TIXIER P. Response of pest control by generalist predators to local-scale plant diversity: a Meta-analysis[J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(4): 1143-1153.

[13] 郭炳茹, 付道猛, 齐绍帆, 等. 野花带对京郊农田地表蜘蛛多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2663-2670. GUO B R, FU D M, QI S F, et al. Effects of wildflower strips on ground-dwelling spider diversity in Beijing suburban cropland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(8): 2663-2670

[14] RADERSCHALL C A, LUNDIN O, LINDSTRÖM S A M, et al. Annual flower strips and honeybee hive supplementation differently affect arthropod guilds and ecosystem services in a mass-flowering crop[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 326: 107754.

[15] HAALAND C, NAISBIT R E, BERSIER L F. Sown wildflower strips for insect conservation: a review[J]. *Insect Conservation and Diversity*, 2011, 4(1): 60-80.

[16] KNAPP M, ŘEZÁČ M. Even the smallest non-crop habitat islands could be beneficial: distribution of carabid beetles and spiders in agricultural landscape[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123052.

[17] 赵义, 王美娜, 金志成, 等. 中国蜘蛛多样性分布格局及其影响因素[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(4): 411-419. ZHAO Y, WANG M N, JIN Z C, et al. Distribution patterns and influencing factors of spider diversity in China[J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2024, 55(4): 411-419.

[18] 张艳荣, 胡文超, 吕苗苗, 等. 小麦-苜蓿邻作带步甲科物种多样性及其时空动态[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(21): 5551-5556. ZHANG Y R, HU W C, LÜ M M, et al. Diversity and temporal-spatial dynamics of carabidae community in wheat-alfalfa neighboring zone [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(21): 5551-5556.

[19] ELEK Z, DRAG L, POKLUDA P, et al. Dispersal of individuals of the flightless grassland ground beetle, *Carabus hungaricus* (Coleoptera: Carabidae), in three populations and what they tell us about mobility

estimates based on mark-recapture[J]. *European Journal of Entomology*, 2014, 111(5):663-668.

[20] CIVIDANES F J. Carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) and biological control of agricultural pests in Latin America[J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2021, 114(2):175-191.

[21] 吴彤林, 谢风云, 赵同贵. 捕食性天敌黄斑青步甲的研究[J]. 中国南方果树, 2009, 38(1):61-62. WU T L, XIE F Y, ZHAO T G. Study on predatory natural enemy *Chlaenius micans*[J]. *South China Fruits*, 2009, 38(1):61-62.

[22] WINDER L, ALEXANDER C J, HOLLAND J M, et al. Predatory activity and spatial pattern: the response of generalist carabids to their aphid prey[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2005, 74(3):443-454.

[23] SYMONDSON W C, SUNDERLAND K D, GREENSTONE M H. Can generalist predators be effective biocontrol agents?[J]. *Annual Review of Entomology*, 2002, 47:561-594.

[24] KOWALSKA J, ANTKOWIAK M, SIENKIEWICZ P. Flower strips and their ecological multifunctionality in agricultural fields[J]. *Agriculture*, 2022, 12(9):1470.

[25] 郑德松, 朱玉麟, 种海南, 等. 水稻田埂捕食性天敌多样性与种群动态[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(5):1000-1008. ZHENG D S, ZHU Y L, CHONG H N, et al. Diversity and population dynamics of predatory natural enemies in paddy field ridges[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2024, 40(5):1000-1008.

[26] SCHMIED H, GETROST L, HAMM A, et al. The flower strip dilemma (FSD): an overlooked challenge in nature conservation and a possible first step towards a solution by combining different aged flower strips [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 347:108375.

[27] PFIFFNER L, WYSS E. Use of sown wildflower strips to enhance natural enemies of agricultural pests[M]//Ecological engineering for pest management: advances in habitat manipulation for arthropods. Wallingford: CABI, 2003:165-186.

[28] AL HASSAN D, GEORGELIN E, DELATTRE T, et al. Does the presence of grassy strips and landscape grain affect the spatial distribution of aphids and their carabid predators? [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2013, 15(1):24-33.

[29] 张旭珠, 韩印, 宇振荣, 等. 半自然农田边界与相邻农田步甲和蜘蛛的时空分布[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6):1879-1888. ZHANG X Z, HAN Y, YU Z R, et al. Spatio-temporal distribution of carabids and spiders between semi-natural field margin and the adjacent crop fields in agricultural landscape[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6):1879-1888.

[30] 边振兴, 吴佳璇, 杨玉静, 等. 非耕作生境对相邻耕地步甲和蜘蛛分布影响的差异性[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7):1026-1037. BIAN Z X, WU J X, YANG Y J, et al. Differences in effects of non-crop habitat on the distribution of carabid beetles and spiders in adjacent farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(7):1026-1037.

[31] TOIVONEN M, HUUSELA-VEISTOLA E, HERZON I. Perennial fallow strips support biological pest control in spring cereal in northern Europe[J]. *Biological Control*, 2018, 121:109-118.

[32] 黄兰媚, 闫雪影, 樊林染, 等. 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[J]. 生态学报, 2024, 44(3):1079-1091. HUANG L M, YAN X Y, FAN L R, et al. Effects of grassy strip width on the dynamics of spider and carabid communities and pest occurrence in adjacent maize fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3):1079-1091.

[33] SCHELLHORN N A, BIANCHI F A, HSU C L. Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: links to pest suppression[J]. *Annual Review of Entomology*, 2014, 59:559-581.

[34] 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[J]. 中国科学:生命科学, 2012, 42(10):825-840. ZHAO Z H, OUYANG F, HE D H. Edge effects and spillover effects of natural enemies on different habitat interfaces of agricultural landscape[J]. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2012, 42(10):825-840.

[35] 段美春, 覃如霞, 张宏斌, 等. 农田节肢动物不同取样方法的综合比较[J]. 生物多样性, 2021, 29(4):477-487. DUAN M C, QIN R X, ZHANG H B, et al. Comprehensive comparison of different sampling methods for arthropod diversity in farmland[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(4):477-487.

[36] 徐丽娜, 佟强, 徐婷婷, 等. 玉米-大豆间作对草地贪夜蛾生长发育及繁殖的影响[J]. 植物保护学报, 2023, 50(3):642-650. XU L N, TONG Q, XU T T, et al. Effects of maize-soybean intercropping on the growth, development and reproduction of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*[J]. *Journal of Plant Protection*, 2023, 50(3):642-650.

[37] SHUKLA G, UPADHYAY V. Free amino acids in the haemolymph of phytophagous, saprophagous and carnivorous insects[J]. *Indian Journal of Entomology*, 1984, 46(2):205-210.

[38] MOURATIDIS A, DE LIMA A P, DICKE M, et al. Predator-prey interactions and life history of *Orius laevigatus* and *O. majusculus* feeding on flower and leaf-inhabiting *Thrips*[J]. *Biological Control*, 2022, 172:104954.

[39] 苏湘宁, 邓海滨, 朱丹荔, 等. 红彩真猎蝽对斜纹夜蛾幼虫捕食行为及室内扩散能力的研究[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(5):111-119. SU X N, DENG H B, ZHU D L, et al. Study on indoor dispersive capacity and predatory behavior of *Harpactor fuscipes* (Fabricius) to larvae of *Spodoptera litura*[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2016, 22(5):111-119.

[40] 王玉雪, 张浩然, 夏鹏亮, 等. 耶气步甲对斜纹夜蛾的捕食功能及其扩散能力研究[J]. 南方农业学报, 2023, 54(12):3610-3618. WANG Y X, ZHANG H R, XIA P L, et al. Predation function and dispersal ability of *Pheropsophus jessoensis* against *Spodoptera litura* [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2023, 54(12):3610-3618.

[41] ROUABAH A, VILLERD J, AMIAUD B, et al. Response of carabid beetles diversity and size distribution to the vegetation structure within differently managed field margins[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200:21-32.

[42] 李朋瑶, 段美春, 宇振荣. 乡村人工林下草本植物对节肢动物多样性的影响[J]. 风景园林, 2023, 30(4):43-49. LI P Y, DUAN M C, YU Z R. Effects of understory herbs on arthropod diversity in rural plantation forests[J]. *Landscape Architecture*, 2023, 30(4):43-49.

[43] 刘云慧, 宇振荣, 刘云. 北京东北旺农田景观步甲群落结构的时空动态比较[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1):85-90. LIU Y H, YU Z R, LIU Y. Temporal and spatial structure of carabid community in agricultural landscape of Dongbeiwang, Beijing[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):85-90.

[44] SHIBUYA S, KIRITANI K, FUKUDA K. Life history traits of five ground beetle (Coleoptera: Carabidae) species common in Honshu Island, Japan[J]. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 2020, 66:185-198.

[45] VARCHOLA J M, DUNN J P. Changes in ground beetle(Coleoptera: Carabidae) assemblages in farming systems bordered by complex or simple roadside vegetation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, 73(1):41-49.

[46] 张旭珠, 张鑫, 宋潇, 等. 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[J]. 生态学报, 2018, 38(23):8442-8454. ZHANG X Z, ZHANG X, SONG X, et al. Effects of vegetated field margins on the distribution of epigaeic carabid beetles and spiders and aphid development in adjacent wheat fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23):8442-8454.

[47] 王丽娟. 陕西子午岭国家级自然保护区不同林型地表甲虫多样性及边缘效应研究[D]. 延安:延安大学, 2018:3-4. WANG L J. Study on diversity and edge effect of ground-dwelling beetles of different forest types in Ziwuling National Nature Reserve, Shaanxi [D]. Yan′an:Yan′an University, 2018:3-4.

[48] TSCHARNTKE T, BOMMARCO R, CLOUGH Y, et al. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale[J]. *Biological Control*, 2007, 43(3):294-309.

[49] FORSYTHE T G. Locomotion in ground beetles (Coleoptera Carabidae): an interpretation of leg structure in functional terms[J]. *Journal of Zoology*, 1983, 200(4):493-507.

[50] MOYNIHAN J A. Mechanisms of stress-induced modulation of immunity[J]. *Brain, Behavior, and Immunity*, 2003, 17(1):11-16.

[51] MORALES J, MORENO J, MERINO S, et al. Associations between immune parameters, parasitism, and stress in breeding pied flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) females[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2004, 82(9):1484-1492.

[52] TSCHUMI M, ALBRECHT M, BÄRTSCHI C, et al. Perennial, species-rich wildflower strips enhance pest control and crop yield[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 220:97-103.

[53] 刘童, 王德好, 杨兵, 等. 氮肥运筹对稻茬麦群体库容及产量的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(增刊1):203-211. LIU T, WANG D H, YANG B, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on storage capacity and yield of rice-stubble wheat population[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(Suppl 1):203-211.

[54] MARTIN E A, SEO B, PARK C R, et al. Scale-dependent effects of landscape composition and configuration on natural enemy diversity, crop herbivory, and yields[J]. *Ecological Applications*, 2016, 26(2):448-462.

(责任编辑:宋潇)