



论文

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

赵紫华^{①②}, 欧阳芳^③, 贺达汉^{①③*}

① 宁夏大学农学院, 银川 750021;

② 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101;

③ 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

* 联系人, E-mail: hedahan@163.com

收稿日期: 2012-07-16; 接受日期: 2012-09-10

国家自然科学基金(批准号: 31260429 和 31200321)资助项目

doi: 10.1360/052012-184

摘要 边缘效应与溢出效应是近几年来生境管理研究的关键问题. 为探讨这 2 种效应对麦蚜天敌种群动态及群落结构的影响, 以及揭示农业景观中天敌的生物控害作用和探索及利用途径, 本文设计 5 种不同的麦田生境界面, 包括麦田-苜蓿草地、麦田-农田防护林、麦田-田埂、麦田-作物以及麦田-裸地. 利用陷阱法、网捕法以及定点采集等方法调查 5 种不同生境界面中麦蚜天敌的丰富度和多度, 并分析其种群及群落的边缘效应以及溢出效应. 结果表明, 非作物生境是多种麦蚜天敌的种群资源库, 尤其是苜蓿草地、农田防护林以及田埂, 这 3 类非作物生境在维持天敌种类和数量中发挥着重要的作用和功能. 苜蓿草地储存大量的天敌资源如寄生蜂、瓢虫、食蚜蝇等, 而且在生境界面上存在着明显的溢出效应. 当麦田麦蚜爆发时, 大量天敌从邻近的苜蓿生境区涌入麦田, 实现对麦蚜有效的生物控害功能. 农田防护林-麦田与田埂-麦田两种界面上麦蚜天敌如步甲与蜘蛛存在明显的边缘效应. 然而, 麦田-作物和麦田-裸地的两种界面上没有明显的边缘效应和溢出效应, 作物和裸地这 2 种生境不能发挥维持天敌种群及群落的作用. 通过分析边缘效应与溢出效应的尺度问题, 结果显示, 影响麦田天敌种群分布的尺度在 30 m 左右, 超过 30 m 的区域边缘效应以及溢出效应不明显. 这些研究结果可以为实现生物控害功能的农业景观格局规划与设计提供重要的理论基础, 也可以为害虫种群控制提供新的思路和方法.

关键词
边缘效应
溢出效应
尺度
界面
麦田
生境管理

生境管理是指通过农业景观格局的设计, 创造最利于天敌的农业景观格局, 利用昆虫间的营养关系最大程度的提高天敌对害虫种群的控制作用, 目前是保护性生物防治的重要发展方向之一. 生境异

质化与多生境组成是复杂农业景观格局的重要特点, 生境界面是农业景观中的重要结构和特征. 近 10 年来, 边缘效应成为生态学研究热点问题^[1], 多生境界面也是现代农业景观中的重要特征之一, 界面上物

英文引用格式: Zhao Z H, Ouyang F, He D H. Edge effects and spillover effects of natural enemies on different habitat interfaces of agricultural landscape. SCIENTIA SINICA Vitae, 2012, 42: 825–840

种的流动与扩散规律是生态系统中生物防治的关键因子之一, 因此生境界面上边缘效应的研究是研究农业景观格局的重要方面^[2], 不同生境界面对昆虫空间分布的影响差异很大, 生境界面非生物环境与植被特征的变异在不同的时空尺度上内影响昆虫的分布及物种组成^[1,3,4]. Thies 等人^[5,6]研究发现, 有些非作物生境与作物生境的界面上天敌频繁的流动, 但也有些界面中几乎没有物种的流动. 有研究指出, 非作物生境是水稻害虫生物防治的重要结构和景观因子^[7~9]. 非作物生境中草地是维持天敌种群的重要组成部分, 能够维持大量的天敌种群, 有些林地也是农业景观中实现生物防治功能的重要景观因子, 但天敌从这些非作物生境向作物生境扩散必须通过界面, 因此生境界面是影响生物防治功能的重要结构, 这同样表明边缘效应对害虫天敌的分布有巨大的影响作用^[10,11]. 有研究表明, 寄生蜂需要在不同的生境间取食, 例如在作物生境中寻找寄主, 而在非作物生境中寻找花粉花蜜等必须的食物资源; 步甲类天敌在草地中栖息, 却在作物生境中捕食, 因此生境界面的质量与组成是影响天敌扩散的关键^[12,13]. 不同类型的生境镶嵌体是中国西北农业景观的突出特点, 特别是在冬春季, 牧草、农田防护林弃耕地和麦田镶嵌排列, 形成高度多样性的麦田生境界面^[14,15]. 形成了大量的生境界面, 这种高度多样性的生境界面中究竟边缘效应是如何影响昆虫的物种组成和分布, 尤其对害虫天敌的影响都还是未知, 因此研究害虫天敌在农田界面的分布以及边缘效应, 能够促进害虫种群控制及成灾爆发机理的研究, 而进一步为害虫可持续治理发生提供新的途径和方法^[16,17].

基于大量的文献, 本文认为边缘效应的尺度及强度是研究的核心问题^[1,17,18], 因此为探讨不同麦田生境界面对天敌的影响及尺度效应, 本文提出了以下假说: (1) 不同生境界面对麦蚜天敌种群分布的影响很大, 草地、农田防护林与田埂斑块可能是麦蚜重要的天敌资源库, 也是农田景观布局中形成对麦蚜有效控制的重要区域, 在这些生境界面上存在明显边缘效应; (2) 同种天敌在不同生境界面中的边缘效应的尺度基本相同, 不受生境类型的影响, 不同天敌在同一生境界面中的边缘效应的尺度不同; (3) 非作物生境是生物防治的重要结构, 但也存在重要的区别, 关键在于植物的种类和结构, 只有特定的功能植物能够维持大量的天敌资源.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域设在宁夏银川平原有代表性的小麦种植区贺兰山军马场与宁夏大学农学院实验基地. 银川平原处于温带干旱地区, 日照充足, 年均日照时数 3000 h 左右, 无霜期约 160 天. 热量资源较丰富, 10℃ 以上有效积温约 3300℃. 气温日较差大, 平均达 13℃, 有利于小麦的生长发育和营养物质积累. 年降水量 200 mm 左右, 黄河年均过境水量达 300 余亿立方米, 灌溉条件较好, 小麦种植历史较长, 是小麦的优质生产基地.

研究区域 I 设在贺兰山农牧场 (38°25'45N, 106°22'21E), 试验研究为 2010~2011 年每年 4~7 月, 这里是银川茂盛草业的生产基地, 有着近 5000 hm² 的人工苜蓿草地, 还有大量的经济林、速生林及果园等, 而且近年来人工牧草与人工林发展迅速, 形成典型的作物-牧草、牧草-农田防护林与作物-农田防护林的相邻种植区域, 土地平坦、种植面积广阔、条田林网纵横, 小麦、牧草、农田防护林与弃耕地呈条带种植, 形成特有的复杂生态农业景观, 种植作物与种植模式多种多样, 春小麦是主要的粮食作物. 我们选择以小麦-牧草为界面的种植区 3 块, 以小麦-农田防护林为界面的种植区 3 块, 每种类型的种植区超过 15 hm².

研究区域 II 设在宁夏大学农学院南厂实验基地 (38°25'45N, 106°22'21E), 试验研究同上, 这里有宁夏大学农学院小麦生产试验田, 实验基地 1500 hm², 主要种植大量的小麦、玉米及大豆等粮食作物, 实验基地内种植全部为粮食作物田, 形成规则小麦-玉米、小麦-大豆与小麦-裸地的种植区域, 土地肥沃, 小麦、玉米与大豆同样呈条带种植, 形成条状生态农业景观, 春小麦是主要的栽培作物, 大约占种植面积的 68%. 2010 年本研究组选择以小麦-玉米为界面的种植区 3 块, 以小麦-田埂为界面的种植区 3 块, 并选择小麦单作田 3 块, 每种类型的种植区超过 10 hm².

1.2 研究方法

研究对象包括麦蚜及天敌群落, 以不同的边缘类型的小麦田块为样地, 在麦蚜的增长期(5月30日以前)与高峰期(5月30日以后)取样, 2个时期内分别调查 4 次. 全面调查小麦斑块内的麦蚜及百株蚜量、寄生

蜂百株虫量, 并采集僵蚜带回实验室饲养鉴定^[10,11].

(1) 边缘效应尺度的研究. 陷阱法调查地表捕食性天敌. 在宁夏大学实验农场小麦种植区, 采用平行线取样法(图 1A), 查地表麦田地表甲虫及蜘蛛. 用一次性塑料水杯(高 9 cm, 口径 7.5 cm)作为陷阱(巴氏罐诱法容器), 有小麦生境界面逐步向内, 共设置陷阱 16 排, 每排 18 个陷阱, 每 6 个 1 组, 每个诱杯间隔 1 m, 每组诱杯间隔 2 m, 每排诱杯间隔 5 m, 向小麦生境内部取样, 一直到 200 m, 陷阱距离麦田上下边缘 30 m 以上(图 1A). 引诱剂为醋、糖、医用酒精和水的混合物, 重量比为 2:1:1:20, 每个诱杯内放引诱剂 40~60 mL. 放置诱杯时间为 6 天, 每隔 6 天收集一次, 并同时更换糖醋液, 收集诱杯内所有节肢动物带回实验室制作成标本并鉴定, 记录每次调查的种类与数量. 苜蓿生境边缘诱杯的设计布局与小麦生境内的诱杯完全对称设计, 也同样为 108 个, 标本采集时间及方法与麦田生境边缘完全一致.

目测与徒手采集法调查僵蚜, 网捕法调查捕食性天敌(瓢虫、草蛉以及食蚜蝇)^[12,13]. 平行线取样法, 具体调查点分布与陷阱的布局一致, 每排随机选择 100 株小麦, 采取目测和计数相结合的方法, 每 100 株小麦观察并记录 15~20 min, 分别记录 100 株小麦上的僵蚜、麦长管蚜、麦二叉蚜有翅蚜与无翅蚜的数量, 将每块样地采集到的所有僵蚜分别装入指形瓶, 带回实验室放入培养皿, 用采集日期与样地代号编号(例如 2009 年 5 月 7 日 14 样地, 编号为 09050714), 放入光照培养箱中饲养, 饲养条件(L:D=16:8,

(20±1)°C, RH=65%±3%), 共饲养 40 天以上, 每天 17 点观察羽化的情况, 直至僵蚜中无新的寄生蜂羽化, 将羽化的寄生蜂放入 90%酒精浸泡, 没有羽化的僵蚜在实验室内解剖, 观察没有羽化的原因, 蚜尸放入 90%酒精, 以待鉴定.

(2) 不同生境界面边缘效应的研究^[12]. 地表捕食性天敌调查. 与边缘效应尺度研究的方法基本类似, 同样采用平行线取样法, 以小麦-苜蓿生境界面为例, 左边为麦田, 右边就是苜蓿草地, 小麦的生境界面埋罐 6 排, 每排 18 个, 每块小区共内设诱杯 108 个(图 1B), 中间阴影的区域即为界面, 苜蓿草地生境的取样采用完全对称设计, 其余设计参考边缘效应尺度的研究(图 1A).

僵蚜及捕食性天敌调查与边缘效应尺度的研究取样方法一致, 生境界面两边寄生蜂的调查设计采用完全对称设计(图 1B), 分别在界面两边的生境中进行, 每排采用网捕法, 每排选 5 个取样点, 每个取样点 10 复网, 每排共 50 复网, 标本采集时间与麦田生境边缘完全一致, 收集网内的标本, 浸泡到 90%的酒精, 全部带回实验室鉴定到种.

小麦-农田防护林、小麦-玉米、小麦-田埂与小麦-裸地取样方法同小麦-苜蓿完全一致, 小麦田埂取样略有差异, 田埂较窄, 只取样 2 排, 裸地只取样 3 排, 其余完全一致(图 1), 每个诱杯内的甲虫全部编号, 带回实验室统计种类与数量, 编号为取生境类型的首字母, 小麦为 W, 苜蓿为 G, 然后第 1 排第 5 个杯子为 0105, 前两位是排数, 后两位是列数, 小麦田第 2 排第 10 个杯子为 W0210, 苜蓿田第 5 排第 12 个杯

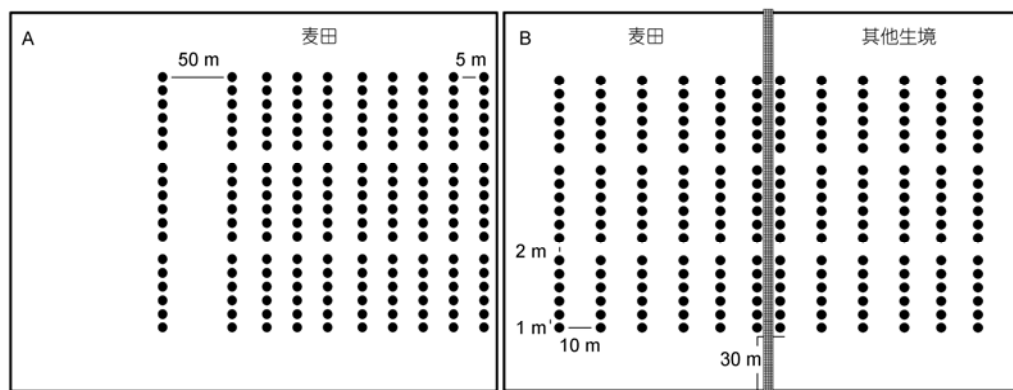


图 1 不同麦田生境界面陷阱的分布及位置

A: 边缘效应的尺度; B: 不同生境界面边缘效应

子为 G0512, 然后记录采集时间与边缘类型, 不同边缘类型的样品分别放置, 以免混乱。

1.3 分析方法

麦蚜及天敌种群数量统计: 步甲、蜘蛛类天敌通过陷阱获得, 计算每 6 个陷阱中的种群数量; 麦蚜换算成百株蚜量; 寄生蜂通过采集僵蚜在实验室内饲养得到, 同时进行扫网, 计算饲养的寄生蜂与网捕得到的数量之和, 作图的数据采用 2011 年麦蚜增长期与高峰期 2 个时期数据的平均值, 增长期与高峰期分别调查 4 次, 每个时期调查数据求和, 然后计算平均值。

天敌类群的划分: 根据不同的营养形式和昆虫的生物生态学特征, 天敌群落划分为寄生性天敌和捕食性天敌分别分析, 寄生性天敌包括蚜茧蜂、茧蜂、姬蜂以及小蜂科等寄生性昆虫, 捕食性天敌包括瓢虫、草蛉、食蚜蝇、蜘蛛以及步甲等捕食性天敌。

累计贡献率: 累计贡献率用来计算某种生态因子的累加效应, 本采用物种数的累计贡献率与个体数的累计贡献率, 以物种数为例, 总的物种总数和作为 1, 计算距离界面不同长度内的物种的分布情况(例如距离界面 30 m 的累计贡献率是包括距离界面 10 m 与 20 m 的物种), 换算为总物种数的百分率, 即为不同尺度下物种的累计贡献率, 距离界面的长度越大, 累计贡献率越高, 最后为 1。个体数的累计贡献率采用同样的分析方法。

多样性指数采用 Shannon-Wiener 指数; 丰富度指数采用物种数表示。

边缘效应的模拟(半方差函数与克里格插值): 半方差分析是地统计学中的一个重要组成部分, 其核心部分是半方差函数, 它通过调查区域化变量等距离的样点间的差异来研究变量的空间自相关性和空间结构。应用半方差函数分析种群的空间分布格局, 实质上是分析种群数量的空间变异特征和自相关系数。本文采用的地统计学空间模拟所用普通克里格法, 通过普通克里格的空间插值, 不仅可对特定样点进行估值, 而且亦能就整个研究区域进行空间分布模拟, 对种群动态和发生趋势从宏观上进行分析和把握, 而准确的模拟种群的分布。克里格插值能够将物种的分布型可视化, 将分散间断的调查数据合成连续的分布图。本文的克里格差值用于模拟天

敌在生境界面两边不同类型的种群分布, 单物种的分布型采用的天敌的个体数进行插值模拟, 群落的分布型采用的多样性指数与丰富度指数进行模拟。分布型的模拟采用地理信息系统 Arc GIS 9.1 软件包完成。

2 结果与分析

2.1 麦蚜天敌在不同生境斑块内的群落组成和结构

(1) 麦蚜天敌在不同生境斑块内的群落组成。通过网捕与陷阱调查实验, 共获得麦田天敌种类 97 种, 只列出了主要天敌 38 种, 小于 15 头的天敌没有列出, 其中麦田天敌总数为 966 头, 苜蓿草地、农田防护林、裸地、玉米生境与田埂分别为 2307, 946, 48, 451 与 895 头。苜蓿草地生境天敌数量最大, 裸地最少。苜蓿人工草地能够维持最大的天敌资源库, 天敌总量是麦田天敌总量的 2.39 倍, 天敌总量占有天敌的 41.1%, 其中双斑猛步甲、赤背步甲、小皮步甲、麻步甲、直角缘步甲、多异瓢虫、龟纹瓢虫、十三星瓢虫、七星瓢虫和异色瓢虫等超过 30% 的种群都在苜蓿草地生境中采集。农田防护林同样维持了较高的天敌资源库, 天敌总量为麦田的 0.98 倍, 占有天敌总量的 16.9%, 其中径婪步甲、强婪步甲和金缘步甲等在农田防护林生境内种群超过 30%。而作物生境内天敌总量仅为麦田的 0.47, 只有单齿螳步甲在作物生境内的种群数量为 31.6%, 其余天敌种类没有超过 30% 的种群数量分布在作物生境。田埂由于较窄, 最宽仅有 20 m, 但却维持了较高的天敌资源, 天敌总量与麦田内天敌总量基本相等, 尤其对个别种类, 田埂维持了最大的种群, 毛青步甲在田埂中的分布占 41.7%, 中华星步甲占 42.6%, 三突花蛛占 36.2%, 窄腹食蚜蝇占 34.2%。裸地生境天敌总量最低, 仅为麦田的 5.1%, 为总量的 0.8%, 没有任何天敌超过 30% 的种群分布在裸地中。

(2) 麦蚜天敌在不同生境斑块内的群落特征。不同生境斑块中麦蚜天敌的种类差异很大(图 2), 麦田、草地、农田防护林、裸地、作物与田埂生境中麦蚜天敌种类分别为 79, 169, 126, 42, 62 和 91 种。草地生境天敌种类最多, 为 169 种, 是麦田的 2.14 倍, 其次为农田防护林, 是麦田的 1.59 倍, 田埂生境中天敌种类是麦田的 1.15 倍, 裸地与作物生境中天敌种

表 1 农田农业景观中主要天敌的种类及分布

物种	麦田(头)	苜蓿草地(头)	农田防护林(头)	裸地(头)	作物(头)	田埂(头)
毛青步甲 <i>Chlaenius pallipes</i>	101	135	263	15	34	392
单齿蝼步甲 <i>Scarites terricola</i>	31	1	3	1	25	18
中华星步甲 <i>Calosoma chinense</i>	16	5	2	1	11	26
双斑猛步甲 <i>Chlaenius bioculatus</i>	11	61	24	2	9	21
赤背步甲 <i>Dolichus halensis</i>	16	53	26	1	14	26
径婪步甲 <i>Harpalus salinus</i>	11	68	126	2	13	16
刘氏三角步甲 <i>Lanchnocrepis prolixa</i>	5	21	15	1	6	9
强婪步甲 <i>Harpalus griseus</i>	8	16	24	0	9	12
肉步甲 <i>Carabus</i> sp.	1	5	9	0	1	2
直角通缘步甲 <i>Pterostichus gebleri</i>	7	31	15	1	5	11
短翅伪葬步甲 <i>Pesudotaphoxenus brevipennis</i>	1	5	6	0	1	3
金缘步甲 <i>Chlaenius spoliatus</i>	2	6	14	1	3	9
隐翅甲 <i>Staphylinus</i> sp.	26	136	156	5	31	96
草间小黑蛛 <i>Erigonidium graminicolum</i>	32	18	11	3	24	16
星豹蛛 <i>Pardosa astrigera</i>	23	14	9	2	18	13
沟渠豹蛛 <i>Pardosa laura</i>	16	23	8	1	12	9
三突花蛛 <i>Misumenops tricuspidatus</i>	9	14	6	0	8	21
草皮逍遥蛛 <i>Philodromus cespitum</i>	8	26	6	1	9	17
鞍形花蟹蛛 <i>Xysticus ephippiatus</i>	7	18	6	1	8	15
多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i>	24	582	3	2	19	14
龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i>	15	78	2	1	12	9
十三星瓢虫 <i>Hippodamia tredecimpunctata</i>	9	43	5	1	7	5
七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i>	3	14	2	1	3	6
异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	5	21	3	0	4	12
凹带食蚜蝇 <i>Metasyrphus corollae</i>	4	16	7	1	6	21
窄腹食蚜蝇 <i>Sphaerophoria cylindrical</i>	3	7	6	1	4	11
大灰食蚜蝇 <i>Metasyrphus corollae</i>	2	4	1	0	3	5
中华草蛉 <i>Chrysopa intima</i>	12	19	3	0	8	6
大草蛉 <i>Chrysopa septempunctata</i>	8	13	4	0	7	4
丽草蛉 <i>Chrysopa Formosa</i>	4	7	2	0	3	2
黑点食蚜盲蝽 <i>Deraeocoris punctulatus</i>	16	186	23	3	21	16
东亚小花蝽 <i>Orius saunteri</i>	8	16	5	0	9	11
燕麦蚜茧蜂 <i>Aphidius avenae</i>	226	386	26	1	32	65
烟蚜茧蜂 <i>A. gifuensis</i>	63	112	8	0	12	17
翼蚜外茧蜂 <i>Praon volucre</i>	6	18	3	0	5	4
四川蚜茧蜂 <i>A. sichuansis</i>	3	11	1	0	2	1
星斑虎甲 <i>Cicindela kaleea</i>	13	58	24	2	16	31
云纹虎甲 <i>Cicindela lunulata</i>	12	38	21	1	12	23
总计	966	2307	946	48	451	895

类较少, 分别为麦田的 0.54 与 0.74. 不同生境斑块中麦蚜天敌的总个体数量也差异较大(图 2), 与麦蚜天敌的物种数基本类似, 草地生境维持了麦蚜天敌最多的种群数量, 总个体数为 2865 头, 是麦田中天敌总量的 2.90 倍, 占有天敌总量的 41.40%, 其次为农田防护林生境, 天敌总个体数为 1362 头, 是麦田中天敌总量的 1.38 倍, 占有天敌总量的 19.68%, 其余依次为田埂、麦田、作物与裸地, 天敌总量分别为 1069, 989, 584 和 52 头, 占

天敌总量的比例分别为 15.45%, 14.28%, 8.4%和 0.8%. 草地生境的天敌物种数与个体数最大, 裸地的天敌物种数与总个体数最小.

2.2 麦蚜天敌群落及优势天敌边缘效应的尺度

麦田界面上天敌物种数的边缘效应较强(图 3A). 当距离界面<20 m 时, 麦田天敌种类随着距离界面的长度增加, 物种累积贡献率增加较快, 距离每增加 5 m, 天敌物种数累计贡献率增加 8%左右, 当离麦田

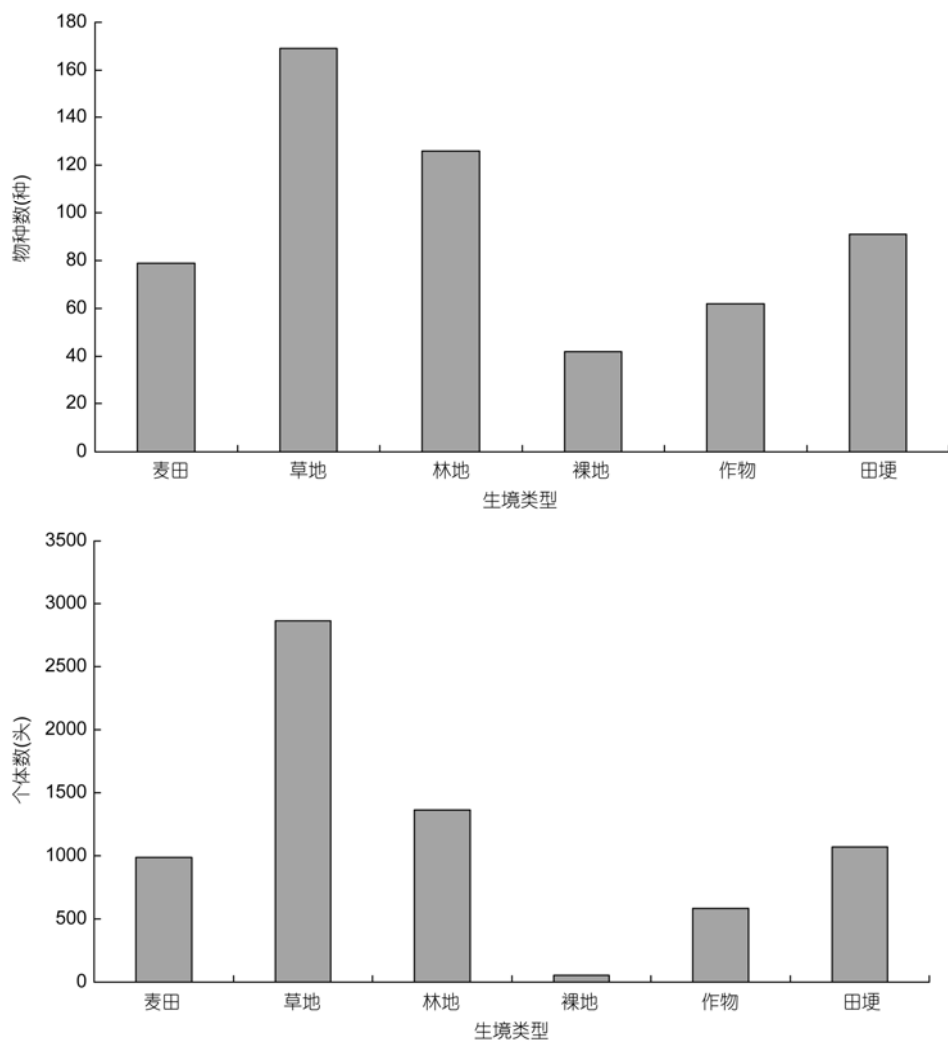


图 2 不同生境中麦蚜天敌物种数和个体数分布图

界面>20 m 以上时, 物种的累积贡献率增加速度逐步减缓, 距离界面的长度再每增加 5 m 时, 天敌物种数就增加 2%左右, 边缘效应逐步减弱. 当距离麦田界面的长度>100 m 以上时, 天敌的物种数累积贡献率仍然在增加, 表明麦田中心离界面>100 m 以上时, 边缘效应仍然存在, 天敌的种类累积贡献率仍然在增加, 虽然物种数累积贡献率增加的速度进一步降低, 但仍然存在微弱的边缘效应.

麦田天敌个体数的边缘效应同样很强(图 3B). 当距离麦田界面的长度<20 m 时, 边缘效应最强, 天敌个体数的累积贡献率增加最快, 当距离麦田界面的长度每增加 5 m, 个体数的累计贡献率增加 9%左右, 当距离麦田界面的长度<30 m 并>20 m 时, 天敌

个体数的累计贡献率增加较快, 这时每增加 5 m, 个体数的累积贡献率增加 5%左右, 当距离麦田界面的长度>30 m 时, 天敌个体数的累计贡献率最慢, 当距离麦田界面的长度每增加 10 m 时, 累计贡献率只增加 1.5%左右, 边缘效应已经减弱, 当距离麦田界面的长度>100 m 以上时, 边缘效应仍然存在, 累积贡献率仍然在增加, 只是贡献率很低.

从麦田生境界面麦蚜 4 种优势天敌的边缘效应分析, 寄生性天敌与捕食性天敌都存在一定的边缘效应, 距离麦田界面的长度越小, 边缘效应越强, 距离麦田界面的长度越大, 边缘效应越弱, 不同天敌种类边缘效应差异很大. 燕麦蚜茧蜂的边缘效应很强(图 4A). 但毛青步甲与星豹蛛边缘效应稍弱, 当距离

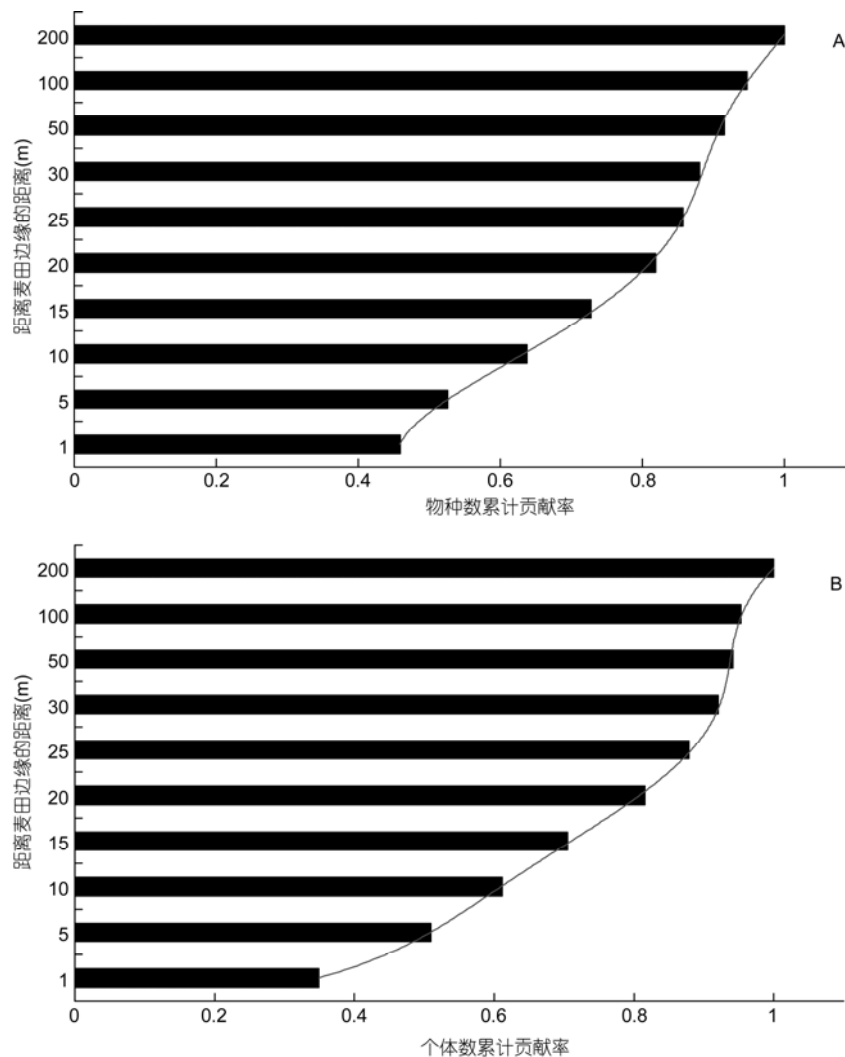


图 3 麦田麦蚜天敌种类数及个体数边缘效应的尺度

麦田界面的长度在 10 m 左右范围内种群数量较高, 而燕麦蚜茧蜂边缘效应的尺度较大, 边缘效应尺度超过 30 m, 与 2 种麦蚜边缘效应的距离相似, 当距离麦田界面的长度超过 40 m 时, 燕麦蚜茧蜂的种群逐步趋于稳定. 烟蚜茧蜂的边缘效应相对较弱(图 4B), 边缘效应的尺度相对较小, 生境界面的种群密度仅比生境内部的种群密度稍高. 烟蚜茧蜂边缘效应的尺度大约在 30 m 左右, 当距离麦田界面的长度超过 30 m 以上时, 烟蚜茧蜂的种群趋于稳定并不变. 星豹蛛的边缘效应不明显(图 4D), 甚至在小麦生境内部仍然有种群数量较高的区域, 星豹蛛的边缘效应没有表现出明显的尺度效应.

2.3 麦蚜天敌在 5 种不同类型生境界面的边缘效应

(1) 麦蚜天敌主要类群在不同类型生境界面的边缘效应. 麦田-苜蓿草地生境界面麦蚜天敌的边缘效应非常明显(图 5A 和 B), 寄生性天敌(寄生蜂)、与捕食性天敌(瓢虫科、草蛉科、食蚜蝇科、步甲科、虎甲科、蜘蛛)与在麦田-草地生境界面的分布分别列出. 寄生性天敌的分布较为特殊, 苜蓿蚜虫与麦蚜的寄生蜂优势种都为燕麦蚜茧蜂(*Aphidius avenae*)与烟蚜茧蜂(*Aphidius gifuensis*), 在麦田-苜蓿草地生境界面处丰富度最高, 而且距离生境界面的麦田生境与苜蓿草地生境中, 界面周围 20 m 内的范围内是寄生蜂丰富度最高的区域, 捕食性天敌的分布与寄生蜂的分

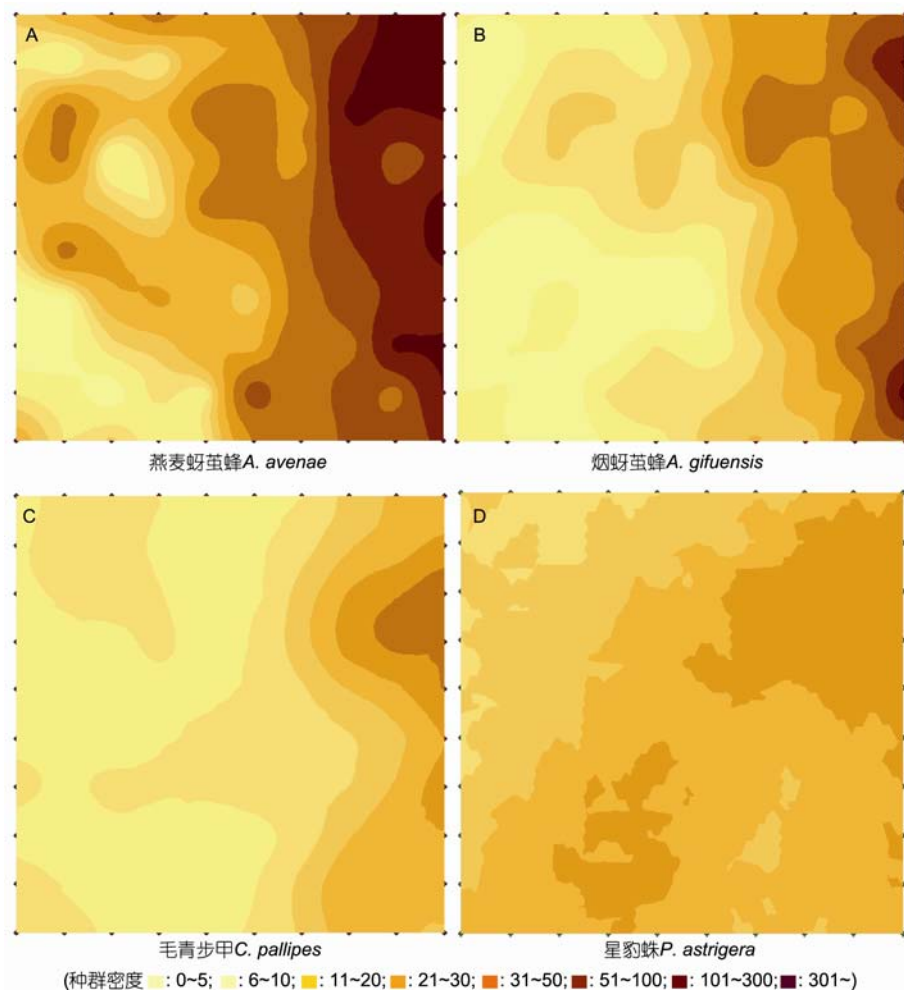


图 4 麦田生境优势天敌的分布模拟及边缘效应尺度

布较为类似, 在生境界面处蜘蛛类天敌的丰富度最高, 距离界面 30 m 的范围内是捕食性天敌丰富度最高的区域.

捕食性天敌主要分布在草地生境中, 苜蓿草地生境内步甲科天敌的丰富度较高, 远远超过麦田生境, 麦田生境内部距离界面的长度越大, 捕食性天敌越少, 距离界面 30 m 以上时, 捕食性天敌呈现一种阈值效应, 种群数量呈指数下降, 距离界面在 30 m 以内时, 捕食性天敌种群是一种缓慢下降(图 5B). 而距离界面 30 m 的草地生境中, 捕食性天敌的种群数量最大, 距离界面长度超过 30 m 的草地生境中捕食性天敌的种群数量逐步下降, 但下降趋势并不明显(图 5B). 但麦田生境内部到界面 30 m 至草地生境内部到界面 30 m 的范

围中, 是捕食性天敌丰富度分布最大的区域, 超过这个区域, 捕食性天敌丰富度都有不同程度的降低.

麦田-农田防护林生境界面麦蚜天敌分布的边缘效应也较明显(图 5C 和 D). 寄生性天敌(寄生蜂)主要分布在麦田-农田防护林的界面处, 尤其是靠近界面的麦田生境中, 距离界面 10 m 左右的麦田生境中内是寄生性天敌种群数量最大的区域, 农田防护林生境内寄生性天敌的种群数量并不大, 而且随着距离界面的长度增加, 寄生性天敌的种群数量呈下降趋势(图 5C). 麦田生境中, 距离界面 0~20 m 的范围内是寄生性天敌种群最大的区域. 捕食性天敌在麦田-农田防护林生境中的边缘效应也较为明显(图 5D). 麦田生境中, 当距离界面的长度 ≤ 10 m 时, 种群数

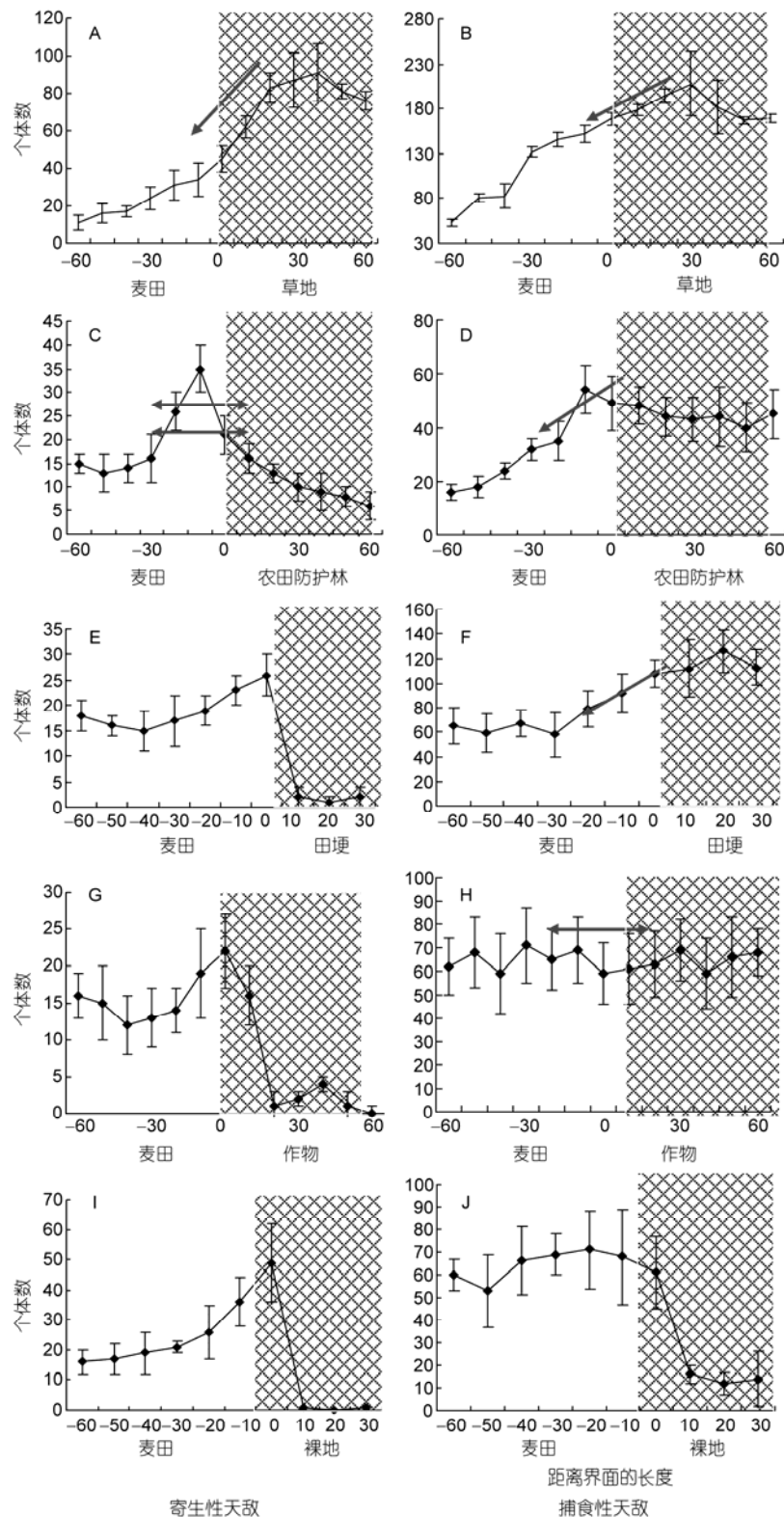


图 5 麦蚜天敌在不同类型生境界面的边缘效应(空白区代表麦田生境, 网格区代表其他生境, 箭头表示昆虫的扩散方向和趋势)

量最大, 当距离界面的长度 ≥ 20 m 时, 捕食性天敌的种群数量迅速下降, 因此距离界面长度 20 m 的范围内是捕食性天敌在麦田内分布最多的区域; 农田防护林生境中, 捕食性天敌的种群分布较为平稳, 并没有明显的波动, 随着距离界面长度的增加, 捕食性天敌一直非常稳定。

麦田-田埂生境界面麦蚜天敌的有些类群边缘效应同样非常明显(图 5E 和 F)。寄生性天敌几乎在田埂上没有分布, 全部出现在麦田生境中(图 5E)。麦田生境中, 距离界面长度越小, 寄生性天敌的种群数量越大, 随着距离界面长度的增加, 寄生性天敌的种群数量有所降低, 但距离界面长度到 30 m 以上时, 种群趋于平稳; 田埂生境中, 寄生性天敌分布很少, 也没有表现出明显的分布变化特点。捕食性天敌在麦田-田埂生境中也表现出一定的边缘效应(图 5F)。麦田生境中, 随着距离界面的长度增加, 捕食性天敌的分布先呈下降趋势, 当距离界面的距离 ≥ 30 m 后, 种群然后趋于稳定; 田埂生境中, 捕食性天敌的分布较多, 没有明显的变化趋势。捕食性天敌在田埂生境中的分布远远高于麦田中的分布。

麦蚜天敌在麦田-作物界面存在微弱的边缘效应(图 5G 和 H)。寄生性天敌在麦田-作物生境界面存在微弱的边缘效应, 麦田生境中, 随着距离界面长度的增加, 寄生性天敌逐步下降后趋于稳定; 作物生境中, 随着距离界面长度的增加, 寄生性天敌迅速下降。寄生性天敌在距离界面 20 m 的麦田中分布最多(图 5G)。捕食性天敌在麦田-作物生境的变化规律与寄生性天敌基本一致(图 5H), 边缘效应不明显, 只有微小的波动, 没有明显的变化规律。

麦蚜天敌在麦田-裸地生境界面基本表现了明显的边缘效应(图 5I 和 J)。寄生性天敌(寄生蜂)在麦田生境界面上表现出明显的边缘效应(图 5I), 麦田生境中, 随着距离界面的长度增加, 寄生性天敌的种群呈对数曲线下降, 距离界面 30 m 的范围内是寄生性天敌分布较多的区域; 裸地中, 寄生性天敌几乎没有分布。捕食性天敌的分布特点与寄生性天敌的分布也基本一致(图 5I), 距离界面 0~40 m 的范围内是捕食性天敌分布最多的区域。

(2) 麦蚜天敌群落与优势天敌在不同类型生境界面的分布模拟。从不同类型生境界面的麦蚜天敌种群分布上分析, 生境界面是麦蚜天敌重要的活动区域, 在天敌种群与群落资源的维持中具有重要的

功能, 有些麦田生境界面是麦蚜天敌种群数量分布较大的区域, 不同的天敌种类在不同的生境类型界面中的分布差异非常大(图 6A~L)。苜蓿草地与麦田的界面是多种天敌极为活跃的区域(图 6A 和 D), 燕麦蚜茧蜂在苜蓿生境中的种群密度远远超过麦田生境中的种群密度, 麦田生境中的燕麦蚜茧蜂种群基本靠苜蓿生境中的种群补充, 形成了天敌从苜蓿到麦田生境的物种流。毛青步甲与星豹蛛在生境界面分布的差异并不明显, 边缘效应相对较弱, 虽然在生境中的分布同样为聚集分布, 但麦田与苜蓿的生境界面处这 2 种天敌的种群分布没有明显的不同。农田防护林与麦田的生境界面也是某些天敌活动的重要区域(图 6B 和 E)。燕麦蚜茧蜂与烟蚜茧蜂在农田防护林生境中的种群数量较低, 主要分布在麦田生境中, 而且在靠近麦田的生境界面处这 2 种天敌的分布明显高于其他区域。毛青步甲在生境界面处的分布没有明显的增多, 在农田防护林生境中种群数量较大, 距离农田防护林生境的距离越远, 毛青步甲的种群数量越低。星豹蛛则在麦田生境中的种群数量较大, 而在生境界面处没有呈现出较强的边缘效应, 在农田防护林中的种群数量稍低于麦田生境中的种群数量。作物与麦田的生境界面对天敌活动以及种群的维持没有明显的影响作用。燕麦蚜茧蜂的种群几乎全部分布在麦田生境, 在作物生境中没有分布, 而烟蚜茧蜂在麦田与作物生境中的种群密度接近, 没有明显差异, 2 种寄生蜂在麦田与作物的生境界面处也没有明显的边缘效应。毛青步甲与星豹蛛的种群分布较为类似, 在麦田与作物生境中以及生境界面是一种聚集分布, 但没有明显的边缘效应。

麦田不同生境界面的天敌群落特征分布模拟表明, 不同的生境界面麦田天敌群落多样性既丰富度的分布明显不同(图 7A~F)。麦田-苜蓿生境界面处是麦蚜天敌多样性与丰富度最高的区域, 而且苜蓿生境中麦蚜天敌的多样性与丰富度都较高, 表明苜蓿生境是麦蚜天敌重要的资源库与种群维持区域, 可以为麦田生境输送大量的天敌资源(图 7A 和 D)。麦田-农田防护林生境界面处的麦蚜天敌群落多样性与丰富度也较高, 但农田防护林天敌多样性与丰富度都低于麦田生境, 农田防护林生境只是在维持地表甲虫与一些蜘蛛类天敌具有较强的功能, 在维持寄生性天敌以及其他一些捕食性天敌的功能较弱, 整体的叠加造成农田防护林生境中麦田天敌多样性

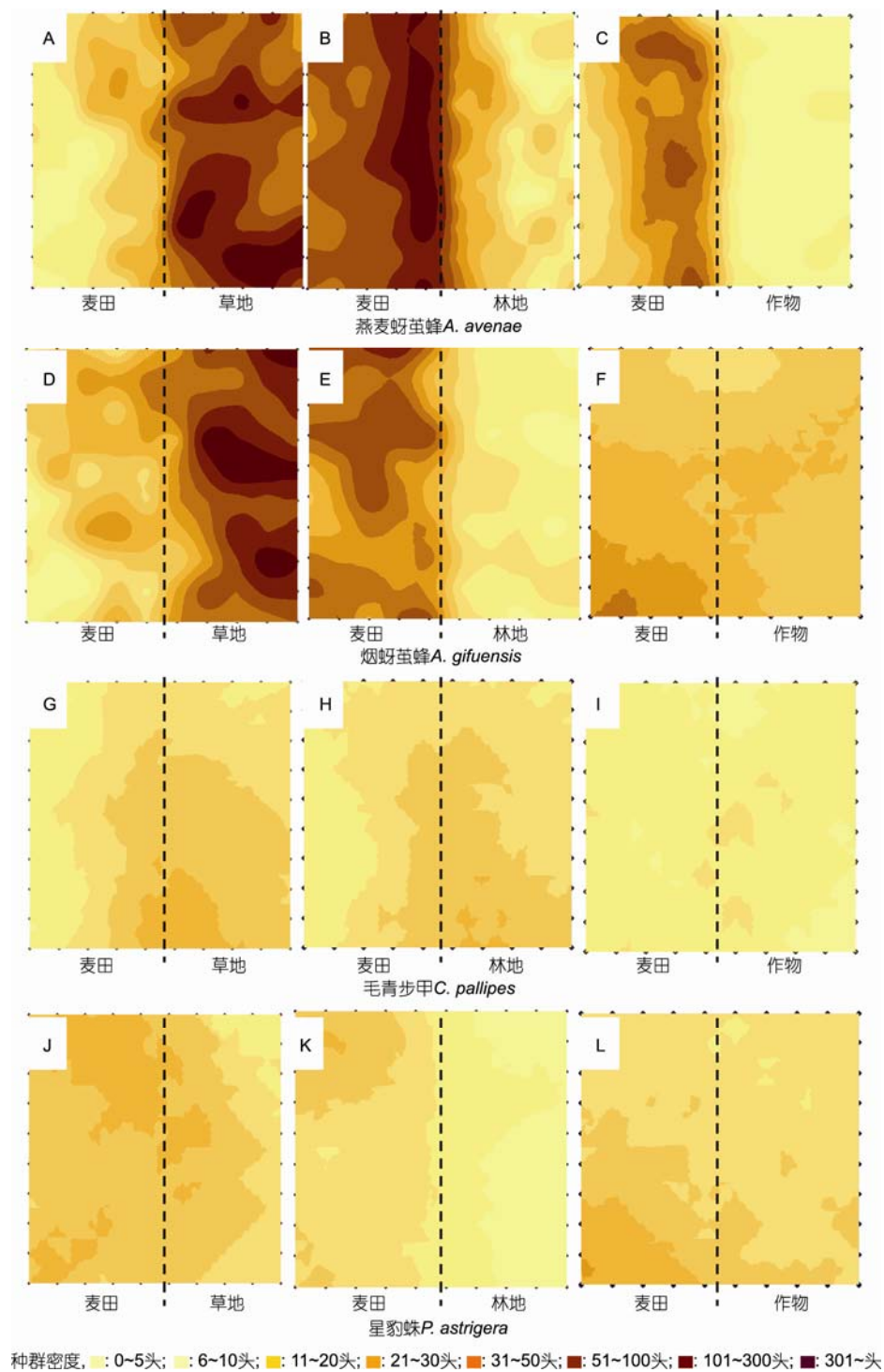


图 6 麦田生境界面优势天敌的种群分布与边缘效应(虚线表示不同生境的界面)

低于麦田生境(图 7B 和 E). 麦田-作物生境界面虽然麦田天敌群落的多样性与丰富度稍高, 但作物生境麦蚜天敌的多样性以及丰富度都较低, 作物生境在

维持麦蚜天敌并没有明显的功能, 寄生性天敌在作物生境中几乎没有分布, 捕食性天敌在麦田及作物生境中的分布较为类似(图 7C 和 F).

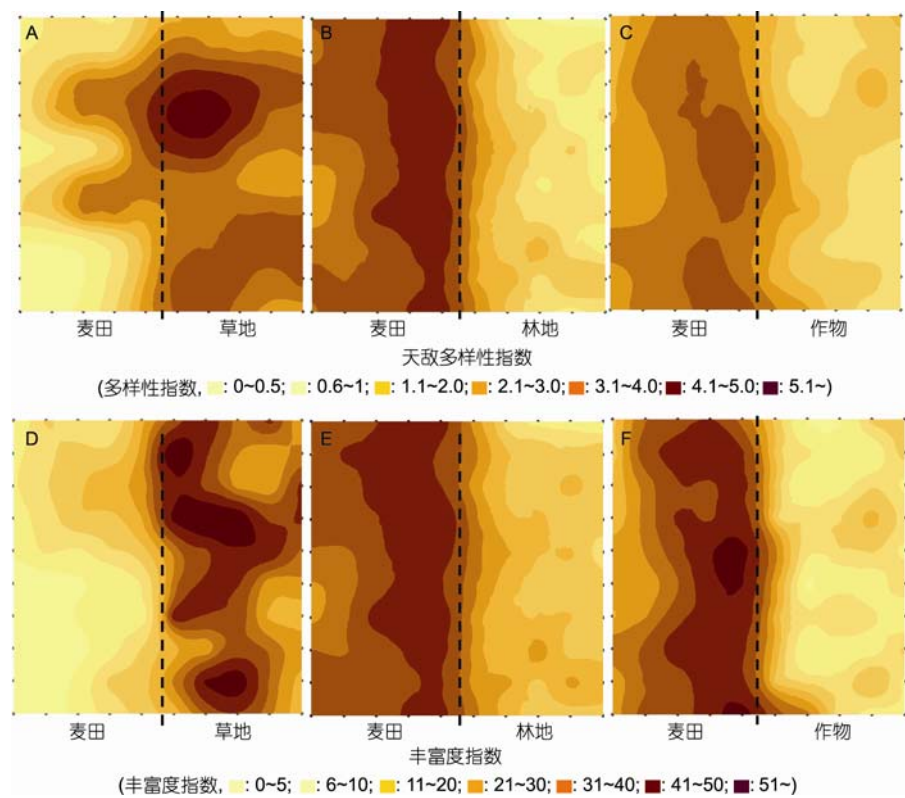


图 7 麦蚜天敌群落结构与边缘效应的关系

3 讨论与结论

3.1 麦田不同生境界面的边缘效应

草地生境通常能够维持较高的生物多样性, 据报道苜蓿人工草地中的昆虫种类超过 1000 种^[10,19], 本文中也发现苜蓿人工草地能够维持大量的天敌资源, 储存了大量的寄生性天敌与捕食性天敌种群, 当相邻农田害虫爆发成灾时, 这些天敌种群能够迅速通过界面扩散到农田中发挥生物控害的功能, 是农业景观设计中进行麦蚜生物防治的重要景观因子. 苜蓿斑蚜 *Therioaphis trifolii* (Monell) 与 2 种麦蚜同时分享多种天敌, 包括寄生性天敌和捕食性天敌^[19,20]. 而两种蚜虫由于狭食性, 苜蓿斑蚜无法在麦田中成活, 同样麦蚜也不能将苜蓿作为转移寄主, 只有天敌可以在两种生境间自由扩散发挥生物防治功能. 当然也有其他人工草地也可能作为天敌资源库, 甚至不同物候期的作物或药材都可以作为麦蚜的天敌资源库, 当这些不同物候期的作物或药材与麦田相邻种植时, 天敌在可以在不同的斑块间相互转移扩散

发挥害虫种群控制作用^[21,22].

农田防护林生境较为复杂, 郁闭度较高, 地表杂草禾本科与菊科植物占优势, 植物多样性较高, 农田防护林与麦田生境界面也有很强的边缘效应, 寄生性天敌在农田-林地界面的边缘效应并不明显, 而对某些步甲天敌种类, 农田防护林是维持地表捕食性天敌的适宜生境, 同样也是农业景观布局中生物防治的有效结构^[22,24]. 而且农田防护林一般高度较高, 对有翅蚜的迁飞有着较好的抑制作用, 有研究表明农田防护林能够增加迁飞蚜虫的死亡率, 从而提高生物控害功能^[25,26]. 农田中田埂较为多样, 宽度不等, 从 1~20 m 之间, 很少受到重视, 一般以一年生杂草为主, 植物种类相对多样化, 不同田块的田埂植物种类可能差异很大, 受到的人为干扰较田间少, 生态环境相对较为稳定^[27]. 本文发现田埂中同样存在大量的天敌资源, 但有些田埂多样性很低, 可能与植物种类与分布密切相关, 不同植被类型的田埂对天敌资源维持的功能差异很大^[28]. 步甲与蜘蛛等捕食性天敌在田埂的多样性较高, 尤其在田间施药或农事操

作时, 田埂成为天敌避难的重要环境, 这时田埂能够降低天敌转移扩散的死亡率^[22]. 近几年来国内也有很多学者认为这些非作物生境是生物防治的重要组成部分, 例如在控制稻纵卷叶螟与稻飞虱等害虫, 非作物生境起到了重要的作用^[7-9]. 这与保护性生物防治的理论相一致, 生物防治的重心不仅仅在作物生境内部, 景观层次上的其他非作物生境同样是生物防治和实现生物控害功能的重要区域^[2,13,22]. Jonsson 等人^[11]认为农业生态系统中大量的生境界面应该作为天敌的扩散通道, 能够顺利的穿过并发挥生物防治功能, 例如麦田与非作物生境界面不应该设计水渠或栅栏等隔离, 以连续生境过度为宜. Schmidt 等人^[28]认为如果农业生态系统的尺度太大会导致害虫爆发频繁, 这种高比例的农田形成天敌空白区, 由于有些天敌有限的扩散能力, 很多种类无法远距离的扩散进行害虫种群控制.

作物是农业景观中的重要组成部分, 作物布局逐步的产业化、规模化与效益化, 集中种植与单种作物的大规模种植成为现代农业的重要特点之一^[11], 本文的研究实验农场科研基地, 是典型的现代农业景观, 作物几乎是景观中唯一的生境类型, 小麦与玉米是试验农场最重要的 2 种作物, 占总面积的 70% 以上. 结果表明, 作物生境与小麦生境基本类似, 麦蚜天敌群落组成较低, 对麦蚜天敌资源库的维持基本没有任何作用, 寄生性天敌在作物生境中的分布最少, 捕食性天敌的分布于麦田生境类似, 甚至更低. 高比例的作物生境并不利于生物防治和生物控害功能, 而且作物生境受到的人为干扰极大, 如农药喷洒、农事操作以及作物栽种收割等, 对天敌种群的影响非常大, 大量天敌无法转移扩散到其他生境而大量死亡^[29].

裸地与设施农业也是麦田农业景观中的重要结构, 据观察, 几乎各种不同类型的裸地能够大量增加有翅蚜迁飞入田的数量, 试验地有大量的麦套玉米, 玉米种植稍迟, 因此早春存在大量的条形裸地, 这种麦套玉米的田间有翅蚜迁入量是单种的 30 倍以上, 但裸地对天敌资源的维持功能却相当的弱, 因此麦田农业景观布局中应该尽量避免大量的裸地, 以降低裸地对有翅蚜迁飞入田的影响. 裸地的土壤反光对有翅蚜的降落有很强的刺激作用, 反射的光波可能是造成有翅蚜降落的重要原因之一, 土壤反光的波长在 600 nm 处较强, 接近于黄色光的 589 nm, 这

可能增加了有翅蚜在裸地周围麦田的迁入量, 但是裸地边缘的麦田中天敌只有微弱的增加, 与麦田生境内部天敌分布差异不显著.

3.2 麦田不同生境的边缘效应的尺度

麦田生境界面多种天敌的有效扩散距离基本在 30 m 以内, 当距离界面长度超过 30 m 后表现出明显的阈值效应, 这也是麦蚜主要天敌分布最多的区域. 多数种类难以在距离界面 30 m 以上的范围寄生或捕食, 克里格差值模拟也证明了这种分布规律, 这表明麦田生境斑块总宽度应该在 60 m 以内, 这是有利于天敌扩散进入麦田, 增加生物防治效果的最优尺度和距离. 麦田-苜蓿草地模式的农业景观布局与生境管理能够大大提高麦蚜生物防治的效果. 苜蓿草地-麦田界面其实是一种明显的溢出效应, 苜蓿草地内天敌种群资源非常丰富, 甚至超过边缘生境的天敌数量, 大量寄生性天敌和捕食性天敌由苜蓿生境内部向外不断扩散, 进入麦田生境中发挥生物控害功能, 而呈现出溢出效应.

农田防护林中通常地表的捕食性天敌非常丰富, 尤其是步甲类与蜘蛛类天敌, 农田防护林中的步甲种类超过 100 种, 不同的农田防护林及林间杂草维持着不同的步甲群落, 可以为麦田输送大量的天敌种群, 各种蜘蛛也是农田防护林地表活动的优势天敌类群, 麦蚜爆发期这些天敌可迅速涌入麦田, 捕食麦蚜. 农田防护林中蜜源植物也是麦蚜寄生蜂必须的生物资源, 而且农田防护林的生境稳定, 可以作为天敌的栖息地、转移寄主的储存地, 甚至是越冬场所^[26,27]. 农田防护林-麦田界面天敌有效的扩散距离也在 30 m 以内, 超过 30 m 后, 边缘生境的天敌也很难扩散, 插值模拟表明优势天敌的分布基本也分布在边缘的 30 m 以内, 因此 30 m 是有利于农田防护林边缘生境中天敌扩散进入麦田, 增加生物防治效果的最好距离, 这种农田防护林-麦田的农业景观布局能够大大提高麦蚜的生物控害. 本文发现距离田埂较近的麦田生境中麦蚜有翅蚜的迁入量比较大, 表明田埂中的某些杂草可能是麦蚜的转移寄主, 田间小麦收割后, 麦蚜转移到田埂中的禾本科杂草上生存并越冬, 在翌年重新迁飞进入麦田, 因此田埂的植物种类应该引起重视, 去除为麦蚜提供寄主的植物种类, 当然田埂也能够维持大量的步甲及蜘蛛种群, 可以为麦蚜种群控制输送大量的天敌资源, 因此田埂功能的两重

性要区别对待, 因此田埂中应该尽量排除麦蚜的寄主植物, 种植对维持天敌资源有利的植物, 使田埂天敌资源库的维持功能发挥的更为完善。

3.3 结论

农业景观中很多生境斑块具有很强的生物防治功能, 人工草地、农田防护林以及田埂都可以作为天敌的资源库, 能够维持大量的天敌种群, 麦蚜爆发时能够迅速涌入麦田, 对麦蚜种群进行生物控制, 这也与本文的假说相一致, 很多天敌需要在多种生境中寻找资源, 例如寄生蜂在非作物生境中取食花粉与花蜜等食物, 在作物生境中寻找寄主。同样很多地表捕食性天敌喜欢在林地或田埂中栖息, 在农田中捕食。利用这些不同的生境界面进行麦蚜的生物控害将是农业景观布局与设计考虑的重要问题^[31,31]。农业景观中作物生境比例的增加是麦蚜生物防治的不利因素, 农田中强烈的人为干扰因素对天敌种群的栖息、交配及繁殖造成了很大的影响, 天敌在这种农业景观中经常无法找到转移寄主而大量死亡。裸地也是农业景观中生物防治的不利因素, 裸地大大增加了麦蚜有翅蚜的迁入量, 造成前期麦蚜种群剧增, 为后来麦蚜的爆发埋下了隐患。

边缘效应是指在两个不同性质的生态系统的界面处, 由于生态因子或系统属性的差异和协同作用而

引起生境界面上某些生物因子较大的变化。溢出效应是指某生境中生态效应不仅在本生境中发挥作用, 而且会对该生境之外的其他生境产生影响。因此苜蓿-麦田生境界面其实是一种溢出效应, 而农田防护林-麦田以及田埂-麦田生境界面是一种边缘效应, 麦田中天敌的有效扩散距离基本在 30 m 以内, 超过这个距离时天敌数量急剧减少, 形成一种阈值效应, 因此在麦田的种植以及景观布局中, 麦田的宽度最好不要超过 60 m, 易于周围边缘生境中天敌种群扩散进入麦田, 对麦蚜种群进行生物控制。农业景观中的合理布局, 多种功能斑块的设置及人为布局是加强害虫生物防治的重要途径之一^[32]。产业化规模化的农业模式对害虫种群控制及生物防治可能会造成不利的影响, 形成多种害虫的频繁爆发, 甚至次要害虫上升为主要害虫以及害虫耐药性的增加, 这些对农业害虫的生物防治都增加了难度, 并制约了作物的生产和长期发展^[24,27]。因此在关注作物格局经济效益的同时, 还应该积极的考虑作物格局对害虫生物防治的影响, 增加自然天敌的控制作用, 将天敌对害虫的生物防治作用提高到更深的层次。当然本文提出的农业景观格局的设计与改造是害虫生物防治的基础, 也就是目前的生境管理(保护性生物防治的主要手段之一), 这可能是未来整个害虫种群控制及生物防治考虑的重要因素, 甚至是生物防治的重要发展方向之一^[33,34]。

致谢 感谢中国科学院动物研究所黄大卫研究员、朱朝东博士、肖辉博士在标本鉴定及确认中给予的巨大帮助, 感谢宁夏农林科学院张蓉博士在样地选择、调查试验及数据处理工作中给予指导; 宁夏大学农学院博士研究生杭佳, 硕士研究生赵映书, 张婷婷, 王颖, 本科生卢纯, 李小虎, 张楠楠, 王斌在试验取样中做了大量的工作, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Tschamtk T, Steffan-Dewenter I, Kruss A, et al. Characteristics of insect populations on habitat fragments: A mini review. *Ecol Res*, 2002, 17: 229-239
- 2 Ewers R M, Didham R K. Pervasive impact of large-scale edge effects on a beetle community. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 5426-5429
- 3 Tschamtk T, Rand T A, Bianchi F J J A. The landscape context of tritrophic interaction: Insect spillover across the crop-noncrop interface. *Ann Zool Fenn*, 2005, 42: 421-432
- 4 Landis D A, Wratten S D, Gurr G M. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annu Rev of Entomol*, 2000, 45: 175-201
- 5 Thies C, Roschewitz I, Tschamtk T. The landscape context of cereal aphid-parasitoid interaction. *P Roy Soc Lond B Bio*, 2005, 272: 203-210

- 6 Thies C, Steffan-Dewenter I, Tscharntke T. Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales. *Oikos*, 2003, 101: 18–25
- 7 刘雨芳, 古德祥, 张古忍. 广东双季稻区杂草和稻田中捕食性节肢动物的群落动态. *昆虫学报*, 2003, 46: 591–597
- 8 林胜, 杨广, 尤民生, 等. 多作稻田生态系统对稻纵卷叶螟及其天敌功能团的影响. *昆虫学报*, 2010, 53: 754–766
- 9 张娟, 梁广文, 曾玲. 不同稻菜轮作模式对稻纵卷叶螟、稻飞虱及其捕食性天敌的影响. *生态学杂志*, 2011, 30: 281–289
- 10 Elliott N C, Kieckhefer R W, Michels G J, et al. Predator abundance in alfalfa fields in relation to aphids, within-field vegetation, and landscape matrix. *Environ Entomol*, 2002, 31: 253–260
- 11 Jonsson M, Wratten S D, Landis D A, et al. Recent advances in conservation biological control of aphropods by aphropods. *Biol Control*, 2000, 45: 172–175
- 12 Garratt M P, Wright D J, Leather S R. The effects of organic and conventional fertilizers on cereal aphids and their natural enemies. *Agr Forest Entomol*, 2010, 12: 307–318
- 13 Tscharntke T, Bommarco R, Clough Y, et al. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biol Control*, 2007, 43: 294–309
- 14 赵紫华, 石云, 贺达汉, 等. 不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响. *生态学报*, 2010, 30: 6380–6388
- 15 赵紫华, 杭佳, 石云, 等. 设施农业景观下破碎化麦田麦蚜及寄生蜂种群的最小适生面积. *应用生态学报*, 2011, 22: 206–214
- 16 Brewer M J, Elliott N C. Biological control of cereal aphids in North America and mediating effects of host plant and habitat manipulation. *Annu Rev Entomol*, 2004, 49: 219–242
- 17 Brewer M J, Noma T, Elliott N C, et al. A landscape view of cereal aphid parasitoid dynamics reveals sensitivity to farm-and region-scale vegetation structure. *Eur J Entomol*, 2008, 105: 503–511
- 18 Schmidt M H, Thewes U, Thies C, et al. Aphid suppression by natural enemies in mulched cereals. *Entomol Exp Appl*, 2004, 113: 87–93
- 19 黄顶成, 张润志, 董兆克, 等. 小麦和牧草上的蚜虫与天敌种群动态及其相互关系. *环境昆虫学报*, 2008, 30: 325–330
- 20 Roschewitz I, Hucker M, Tscharntke T, et al. The influence of landscape context and farming practices on parasitism of cereal aphids. *Agr Ecosyst Environ*, 2005, 108: 218–227
- 21 周海波, 陈巨莲, 程登发, 等. 小麦间作豌豆对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. *昆虫学报*, 2009, 52: 775–782
- 22 Schmidt M H, Roschewitz I, Thies C, et al. Differential effects of landscape and management on diversity and density of ground-dwelling farmland spiders. *J App Ecol*, 2005, 42: 281–287
- 23 Lee J H, Elliott N C, Kindler S D, et al. Natural enemies impact on the Russian wheat aphid in Southeastern Colorado. *Environ Entomol*, 2005, 34: 115–123
- 24 Leslie T W, Van Der Werf W, Bianchif F J J A, et al. Population dynamics of cereal aphids: influence of a shared predator and weather. *Agr Forest Entomol*, 2009, 11: 79–82
- 25 Levie A, Dogot P, Hance T. Release of *Aphidius rhopalosiphi* (Hymenoptera: Aphidiinae) for cereal aphid control: field cage experiments. *Eur J Entomol*, 2000, 97: 527–531
- 26 Legrand M A, Colinet H, Vernon P, et al. Autumn, winter and spring dynamics of aphid *Sitobion avenae* and parasitoid *Aphidius rhopalosiphi* interactions. *Annu Appl Biol*, 2004, 145: 139–144
- 27 Tscharntke T, Bommarco R, Clough Y, et al. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biol Control*, 2007, 43: 294–209
- 28 Schmidt M H, Lauer A, Purtauf T, et al. Relative importance of predators and parasitoids for cereal aphid control. *P Roy Soc Lomd B Bio*, 2003, 270: 1905–1909
- 29 Langer A, Hance T. Enhancing parasitism of wheat aphids through apparent competition: A tool for biological control. *Agr Ecosyst Environ*, 2004, 102: 205–212
- 30 Elliott N C, Tao F L, Giles K L, et al. Ground beetle density in Oklahoma winter wheat fields. *Southwestern Entomol*, 2006, 31: 121–128
- 31 Cronin J T. Habitat edges, within-patch dispersion of hosts, and parasitoid oviposition behavior. *Ecology*, 2009, 90: 196–207
- 32 Zhao Z H, He D H, Hui C. From the inverse density-area relationship to the minimum patch size of a host-parasitoid system. *Ecol Res*, 2012, 27: 303–308
- 33 赵紫华, 王颖, 贺达汉, 等. 麦蚜和寄生蜂对农业景观格局的响应及其关键景观因子分析. *生态学报*, 2012, 32: 472–482
- 34 赵紫华, 关晓庆, 贺达汉. 农业景观结构对麦蚜寄生蜂群落组成的影响. *应用昆虫学报*, 2012, 49: 220–228

Edge Effects and Spillover Effects of Natural Enemies on Different Habitat Interfaces of Agricultural Landscape

ZHAO ZiHua^{1,2}, OUYANG Fang² & HE DaHan^{1,3}

1 Agricultural School, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3 State Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

A majority of empirical tests have succeeded to support the hypothesis of edge effects and spillover effects. However, the two hypotheses tested in agro-ecosystems were rare. In order to discover edge effects and spillover effects on natural enemy's populations of wheat aphids, we designed 5 different habitat interfaces including wheat-alfalfa, wheat-tree land, wheat-range, wheat-crop and wheat-bare land in Northwest of China. The biological control of natural enemies for wheat aphids were analyzed which aims to conduct habitat management in agricultural landscapes. We studied edge effects and spillover effects of natural enemy's population and distribution through barber traps, net sweeping and clapper collection. Results showed that non-crop was important resource pool of natural enemies especially in alfalfa habitat, tree land and range habitat. Populations and communities of natural enemies in non-crop habitat played an important those role in biological control of wheat aphids. Communities of natural enemies (parasitoids and predators) in alfalfa were the same as those in wheat fields. In interface of alfalfa-wheat, spillover effects obviously exist. A majority of natural enemies (spiders and carabid beetle) immigrating from alfalfa habitat spread into wheat field and suppressed wheat aphids to a great extent. In interfaces of wheat-tree land and wheat-range, edge effects obviously exist. The biodiversity of natural enemies was higher in the interfaces than the inside of habitat. Hosts could be found in wheat habitat. Flowers, nectar and refuges could be found in non-crop habitat. Populations of natural enemies were larger in interface of wheat and non-crop than in other regions. However, crop habitat and bare land could play an important role in biological pest control of cereal aphids. The scale of edge effect was about 30 m below which natural enemies' populations were more abundant than those in other regions. All these results can be applied in agricultural landscape design which aims at biological control and provided important theoretical principles, and also supplied new ways and methods for pest population control.

edge effects, spillover effects, scale, interfaces, wheat fields, habitat management

doi: 10.1360/052012-184