

小尺度下景观多样性对小菜蛾种群的调控*

张 杰^{1, 2, 3**} 何玮毅^{1, 2, 3} 杨 广^{1, 2, 3} 黄 斌^{1, 4***} 侯有明^{1, 4***}

(1. 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福建农林大学应用生态研究所, 福州 350002;

2. 教育部害虫生态防控国际合作联合实验室, 福建农林大学, 福州 350002;

3. 农业部闽台作物有害生物综合治理重点实验室, 福建农林大学, 福州 350002;

4. 福建省昆虫生态重点实验室, 福州 350002)

摘 要 【目的】小菜蛾 *Plutella xylostella* 危害十字花科蔬菜严重, 通过分析景观多样性对小菜蛾种群及其天敌蜘蛛的影响, 寻求一种可持续控制小菜蛾的方法。【方法】在福建省选择不同农业景观多样性的采样点, 分析半径分别为 25, 50, 100 m 空间范围内不同景观类型组成, 调查田间小菜蛾种群的丰富度、产卵量和取食量, 以及天敌蜘蛛的丰富度, 分析景观多样性对小菜蛾种群的影响。【结果】随自然生境比例增加, 小菜蛾种群丰富度显著降低, 其产卵量受到影响, 但对其取食量没有显著影响, 蜘蛛的种群丰富度也显著升高。主成分分析表明草地、林地和水域等生境面积都与小菜蛾种群丰富度呈负相关关系, 且草地的负相关性最强。【结论】在半径小于 100 m 的空间范围内, 提高农业景观多样性, 特别是增加草地的面积, 有助于提高对田间小菜蛾种群的控制。

关键词 小菜蛾; 丰富度; 自然生境; 天敌; 可持续控制

Landscape diversity regulates diamondback moth populations on small spatial scales

ZHANG Jie^{1, 2, 3**} HE Wei-Yi^{1, 2, 3} YANG Guang^{1, 2, 3}
HUANG Bin^{1, 4***} HOU You-Ming^{1, 4***}

(1. State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Institute of Applied Ecology,

Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Joint International Research Laboratory of Ecological Pest Control, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China;

3. Key Laboratory of Integrated Pest Management for Fujian-Taiwan Crops, Ministry of Agriculture, Fuzhou 350002, China;

4. Key Laboratory of Insect Ecology in Fujian, Fuzhou 350002, China)

Abstract [Objectives] To develop a sustainable method for controlling the diamondback moth (DBM), *Plutella xylostella*, which inflicts serious damage on cruciferous vegetable crops, by investigating the effects of landscape diversity on DBM and predatory spider populations. [Methods] Sampling sites were chosen based on an increasing diversity gradient in Fujian Province and the landscape composition was analyzed at radii of 25, 50, 100 m. The effect of landscape diversity on DBM abundance, fecundity and crop damage, and on spider abundance, was analyzed. [Results] DBM abundance decreased significantly as the percentage of natural habitat increased. Its fecundity was highest in landscapes with moderate diversity but there was no significant landscape effect on crop damage. Spider abundance had the opposite trend. Principal component analysis (PCA) indicates negative correlations between the percentage of grassland, forest and water and DBM abundance. [Conclusion] Improving landscape diversity, specifically maintaining more grassland, is an effective way of controlling DBM at spatial scales less than 100 m.

Key words diamondback moth; abundance; natural habitat; natural enemies; sustainable control

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划(2017YFD0200400; 2018YFD0201209-05); 国家自然科学基金重点项目(31230061)

**第一作者 First author, E-mail: jkwalker@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: huangbin@fafu.edu.cn; ymhou@fafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2019-11-06; 接受日期 Accepted: 2019-12-26

生态学原理和研究成果表明,人类可以通过采用适当的措施来恢复和强化农田生物多样性,提高天敌的控制潜能,减少害虫发生的可能性(尤民生等,2004)。采用合理的耕作制度和栽培措施,保护和强化农田生物多样性,恢复和重组农田生态系统的动态平衡,有利于农业害虫的生态控制和综合治理(Altieri, 1994)。然而,现代农业的大规模集约化生产,导致农业景观中的生境多样性减少及自然生境的破碎化,从而导致了农业生态系统生物多样性降低、害虫控制功能丧失等一系列问题(Higgins, 2007; Bommarco *et al.*, 2013; Crowder and Jabbour, 2014; Rusch *et al.*, 2016)。

相比于集约化农业景观,复杂的农业景观中天敌对害虫控制作用更强(Thies *et al.*, 2011; Grab *et al.*, 2018; Togni *et al.*, 2019)。提高农业景观中非作物生境比例,有助于增加天敌的种类和数量,提高农业生态系统稳定性,从而增强其生物防治功能(Tscharntke *et al.*, 2012)。例如,在德国油菜田中,随非作物生境的比例增加,寄生蜂对花粉甲 *Meligethes aeneus* 的寄生率升高,花粉甲危害降低(Thies and Tscharntke, 1999; Thies *et al.*, 2003)。在华北地区,非作物生境增加有助于麦田中的瓢虫早期种群的发生及蜘蛛多样性的提高(杨龙等,2016;赵爽等,2017)。但景观多样性对天敌的影响并不是决定其害虫控制效能的唯一因素(Concepción *et al.*, 2008; Letourneau *et al.*, 2009; Chaplin-Kramer *et al.*, 2011)。生境多样性的增加,也可以通过视觉和嗅觉干扰害虫的觅食、扩散和产卵等行为活动(Couty *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2006),影响其能量分配,导致害虫繁殖力降低。例如,烟粉虱 *Bemisia tabaci* 在面对多种相近寄主植物时,雌性烟粉虱会因选择困难,飞行活动增加,导致最终产卵量降低(Bird and Krüger, 2006)。帕眼蝶 *Pararge aegeria* 在景观结构改变时其飞行活动同样增加,导致其繁殖力降低、寿命缩短(Gibbs and Dyck, 2010)。对宁夏地区不同农业景观结构中麦蚜种群动态调查发现,复杂农业景观下有翅麦蚜的迁入量要显著低于简单农业

景观中有翅麦蚜的迁入量(赵紫华等,2010)。可见,提高农业景观多样性,不仅可以提高天敌“自上而下”的控制作用,也可以通过干扰害虫行为活动提高“自下而上”的控制作用。所以,只有了解各景观要素对害虫的具体作用,才可以针对性地制定更为有效的防治策略。

小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.) 属鳞翅目 Lepidoptera 菜蛾科 Plutellidae。主要为害十字花科蔬菜,且分布范围广(尤民生和魏辉,2007)、迁飞能力强(Fu *et al.*, 2014)、抗药性强(李振宇等,2016),对十字花科蔬菜的生产造成了严重损失,仅在中国每年造成的经济损失就约 7.7 亿美元(Li *et al.*, 2016)。Furlong 等(2013)认为,以单一手段对小菜蛾进行控制明显是失败的,害虫综合防治(Integrated pest management, IPM)才是控制害虫的有效策略和途径。而景观生态学作为一门研究空间格局和生态过程相互关系的学科(Turner, 2005),其核心研究论题之一就是如何优化景观中斑块组成、空间配置及基底特征,从而最有利于生物多样性保护和生态系统管理和可持续发展(邬建国,2007)。因此,本研究基于景观多样性,假设景观多样性的提高会导致小菜蛾丰富度降低,探讨景观多样性对小菜蛾的控制作用及其内在原因,为利用景观多样性进行生物防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本实验在福建省两处传统蔬菜种植区开展,分别是漳浦县(24°7'N, 117°36'E)和建瓯市(县级)(27°45'N, 118°2'E),如图1所示。其中漳浦县位于福建省南部沿海平原地区,是传统的农业大县,以集约化种植为主。建瓯市位于福建省北部山地地区,四季分明,是闽北地区主要的蔬菜产区,以小面积的斑块化种植为主。采样点选自专业蔬菜公司种植基地,对水肥及农药的管理都按照统一标准进行。采样期间漳浦种植蔬菜为包菜 *Brassica oleracea* var. *capitata*, 建瓯种植蔬菜为花椰菜 *Brassica oleracea* var. *botrytis*。

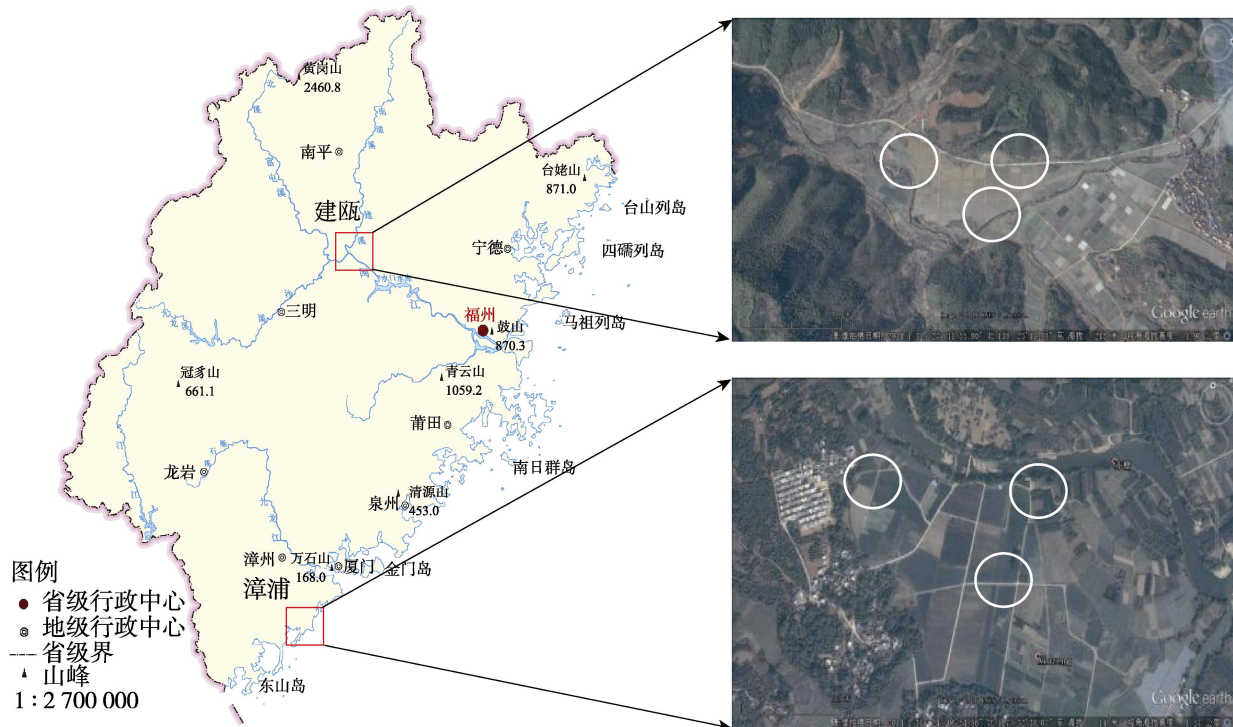


图 1 调查地区在福建省内位置示意图

Fig. 1 The location of investigated district in Fujian Province

地图来自国家地理信息公共服务平台 <http://www.tianditu.gov.cn/>.

Map downloaded from National Platform for Common Geospatial Information Services <http://www.tianditu.gov.cn/>.

1.2 农业景观多样性调查

在两个调查区（图 1）按照景观多样性梯度选择采样点,各采样点之间相互距离大于 100 m。以中心采样点为圆心,长度 100 m 为半径做圆,实地调查圆内各个斑块的植被类型。农业景观中

斑块种类包括十字花科作物（含包菜、花椰菜、油菜）、自然生境（含自然林、青枣林、龙眼林、草地、休耕地、水域）、硬化道路、非十字花科作物（含玉米、水稻、辣椒、菜豆）。采样点不同斑块类型如图 2 所示。



图 2 采样点不同斑块类型分布示意图

Fig. 2 The distribution of different patches in sampling sites

由于小菜蛾的扩散能力较弱,除少数可扩散分布至 110 m 处外大多数扩散在半径在 35 m 范围内 (Mo, 2003), 因此, 选择半径 100 m 作为景观分析的最大空间尺度, 分别分析半径为 25、50 和 100 m 范围内农业景观中各斑块所占比例 (图 3)。以自然生境比例和香农-维纳 (Shannon-Wiener) 多样性指数作为景观多样性指标 (Jonsen and Fahrig, 1997; Chisholm *et al.*, 2014; Ortega and Pascual, 2014)。

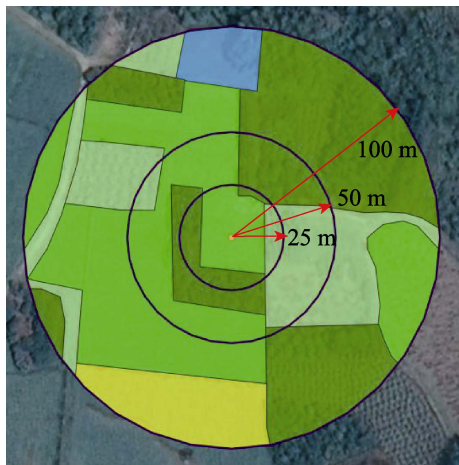


图 3 采样点不同空间尺度景观分析示意图
Fig. 3 Landscape analysis of sampling sites at different spatial scales

1.3 小菜蛾成虫种群和天敌蜘蛛种群丰富度的调查

田间调查时间为 2015 年 3 月 10 日至 2015 年 5 月 20 日, 该时期是小菜蛾的为害高峰期。通过性诱剂诱捕对小菜蛾成虫进行调查, 在每个景观尺度下分别设置 5 个诱捕器, 在漳浦共设置 45 个诱捕器, 建瓯共设置 35 个诱捕器。每隔 3 d 调查计数 1 次, 共调查 3 次。利用手持 GPS (GPSMAP 62, 中国台湾国际航电股份有限公司) 对诱捕器进行定位。

蜘蛛的调查采用“Z”形取样法, 随机选取 20 棵蔬菜, 采集菜叶上和地面上的蜘蛛, 将收集到的蜘蛛带回实验室分类鉴定。每 3 d 调查 1 次, 调查 3 次。

1.4 小菜蛾取食量和产卵量的测定

考虑到景观多样性对小菜蛾适应性的影响,

调查了小菜蛾在不同农业景观中的取食量和产卵量, 收集不同农业景观中小菜蛾的蛹, 带回室内喂养至其羽化产卵, 统计产卵量。

(1) 取食量的测定

选取 3 龄小菜蛾幼虫的日取食面积作为取食量的指标。在田间采集一定数量小菜蛾幼虫, 随机选取 3 龄幼虫 10 头, 分别放入塑料培养皿内, 放入新鲜蔬菜叶片, 菜叶与幼虫寄主品种一致, 用湿棉球保湿。每隔 24 h 更换 1 次叶片, 用十字方格纸测定取食面积, 至幼虫化蛹为止。计算每日取食面积, 重复 3 次。

(2) 产卵量的测定

将田间采集的小菜蛾蛹带回实验室内, 羽化后随机配成 10 对, 分别放入玻璃指形管内, 并用蘸有 10% 蜂蜜水的棉花塞住, 待其在管壁上产卵。24 h 后更换指形管和棉花, 并对管壁上卵进行计数, 至成虫停止产卵, 得到雌虫在产卵期内的总产卵量, 重复 3 次。

1.5 数据分析

根据 QGIS3.4 分析得到各个斑块所占面积比例, 利用数据分析软件 R(v. 2.15.1) 分别计算景观多样性指数, 包括自然生境比例和 Shannon-Wiener 多样性指数, 计算公式如下,

自然生境的比例=

$$\frac{\text{自然生境的面积}}{\text{自然生境的面积} + \text{作物生境的面积}}$$

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

其中 P_i 为第 i 种斑块在整个景观中的比例, S 为总的斑块数。

对不同农业景观中小菜蛾种群丰富度、取食量和产卵量数据用 SPSS 19.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois) 做单因素方差分析 (One-way ANOVA), 并用 Turkey 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同采样点的景观多样性分析

以自然生境所占比例和香农-威纳指数作为

景观多样性指标, 对各采样点进行多样性分析, 其景观多样性参数如表 1 所示。采样点可分为简

单农业景观 A、中等多样性农业景观 B 和复杂农业景观 C。

表 1 漳浦和建瓯两地的采样点的景观多样性分析
Table 1 Analysis of the sampling sites in Zhangpu and Jianou

多样性指标 Landscape diversity index		采样点 A Sampling site A			采样点 B Sampling site B			采样点 C Sampling site C		
		25 m	50 m	100 m	25 m	50 m	100 m	25 m	50 m	100 m
漳浦 Zhangpu	自然生境比例 Percentage of natural area	3%	24%	25%	42%	51%	49%	46%	55%	53%
	香农-维纳指数 Shannon-Wiener index	0.10	0.62	0.73	0.93	1.03	1.13	0.98	1.06	1.36
建瓯 Jianou	自然生境比例 Percentage of natural area	12%	9%	21%	23%	46%	44%	40%	56%	61%
	香农-维纳指数 Shannon-Wiener index	0.37	0.30	0.70	0.54	1.04	1.54	1.15	1.51	1.62

2.2 景观多样性对小菜蛾种群的影响

2.2.1 景观多样性对小菜蛾种群丰富度的影响

如图 4 (A) 所示, 在调查的 3 个空间尺度下, 小菜蛾的丰富度都随景观多样性升高而显著降低。在漳浦县, 不同空间尺度下的复杂景观中小菜蛾种群丰富度比简单景观中分别显著降低了 79.7%、52.2% 和 30.8% (空间尺度 25 m: $F_{2,39} = 26.439$, $P = 0.000$; 空间尺度 50 m: $F_{2,39} = 10.009$, $P = 0.000$; 空间尺度 100 m: $F_{2,45} = 6.591$, $P = 0.003$), 种群丰富度最高从 (440.30 ± 40.10) 头降低到 (93.80 ± 12.70) 头。建瓯地区小菜蛾的种群丰富度也随景观多样性升高而显著降低 (空间尺度 25 m: $F_{2,33} = 25.704$, $P = 0.000$; 空间尺度 50 m: $F_{2,36} = 18.841$, $P = 0.000$; 空间尺度 100 m: $F_{2,27} = 8.985$, $P = 0.001$), 种群数量分别减少了 86.2%、77.1% 和 67.6%, 最高从 (187.80 ± 21.13) 头减少到 (25.89 ± 7.89) 头。同样, 如图 4 (B) 所示, 在不同的空间尺度上, 小菜蛾种群丰富度与香浓多样性指数也表现为显著负相关。

2.2.2 景观多样性对小菜蛾取食量和产卵量的影响

对小菜蛾产卵量进行分析, 结果如图 5 (A), 在 3 个空间尺度下, 小菜蛾的产卵量都呈先增高再降低的趋势, 其中漳浦地区不同农业景观中产卵量表现出显著差异 (空间尺度为 25 m: $F_{2,17} = 6.392$, $P = 0.009$; 空间尺度为 50 m:

$F_{2,36} = 4.498$, $P = 0.018$; 空间尺度为 100 m: $F_{2,54} = 3.756$, $P = 0.03$)。在中等多样性的农业景观中小菜蛾产卵量最高, 最高可达到 (120.75 ± 9.75) 粒/头, 而在复杂农业景观中最低只有 (77.17 ± 8.70) 粒/头。建瓯地区的小菜蛾产卵量虽然表现出相似的趋势, 却并没有显著差异性 (空间尺度为 25 m: $F_{2,22} = 0.442$, $P = 0.648$; 空间尺度为 500 m: $F_{2,60} = 0.448$; $P = 0.641$; 空间尺度为 100 m: $F_{2,90} = 0.216$, $P = 0.806$)。可见, 小菜蛾在中等多样性景观中繁殖力最高。

对小菜蛾取食量的分析结果如图 5 (B), 在不同的空间尺度下, 小菜蛾的取食量随景观多样性增加而有所降低, 但是都没有表现出显著差异性 (空间尺度为 25 m 时, 漳浦 $F_{2,47} = 2.544$, $P = 0.089$, 建瓯 $F_{2,53} = 1.640$, $P = 0.204$; 空间尺度为 50 m 时, 漳浦 $F_{2,46} = 1.048$, $P = 0.359$, 建瓯 $F_{2,40} = 0.971$, $P = 0.388$; 空间尺度为 100 m 时, 漳浦 $F_{2,47} = 1.071$, $P = 0.351$, 建瓯 $F_{2,49} = 1.709$, $P = 0.199$)。

2.3 景观多样性对天敌蜘蛛种群的影响

对漳浦和建瓯蜘蛛进行鉴定, 漳浦有蜘蛛 9 种, 建瓯有蜘蛛 19 种。对不同景观多样性条件下 (半径 $r=100$ m) 天敌蜘蛛的数量进行分析, 如图 6 所示, 在漳浦和建瓯两地, 随自然生境比例增加, 天敌蜘蛛种群丰富度都显著增加 ($F_{2,8} =$

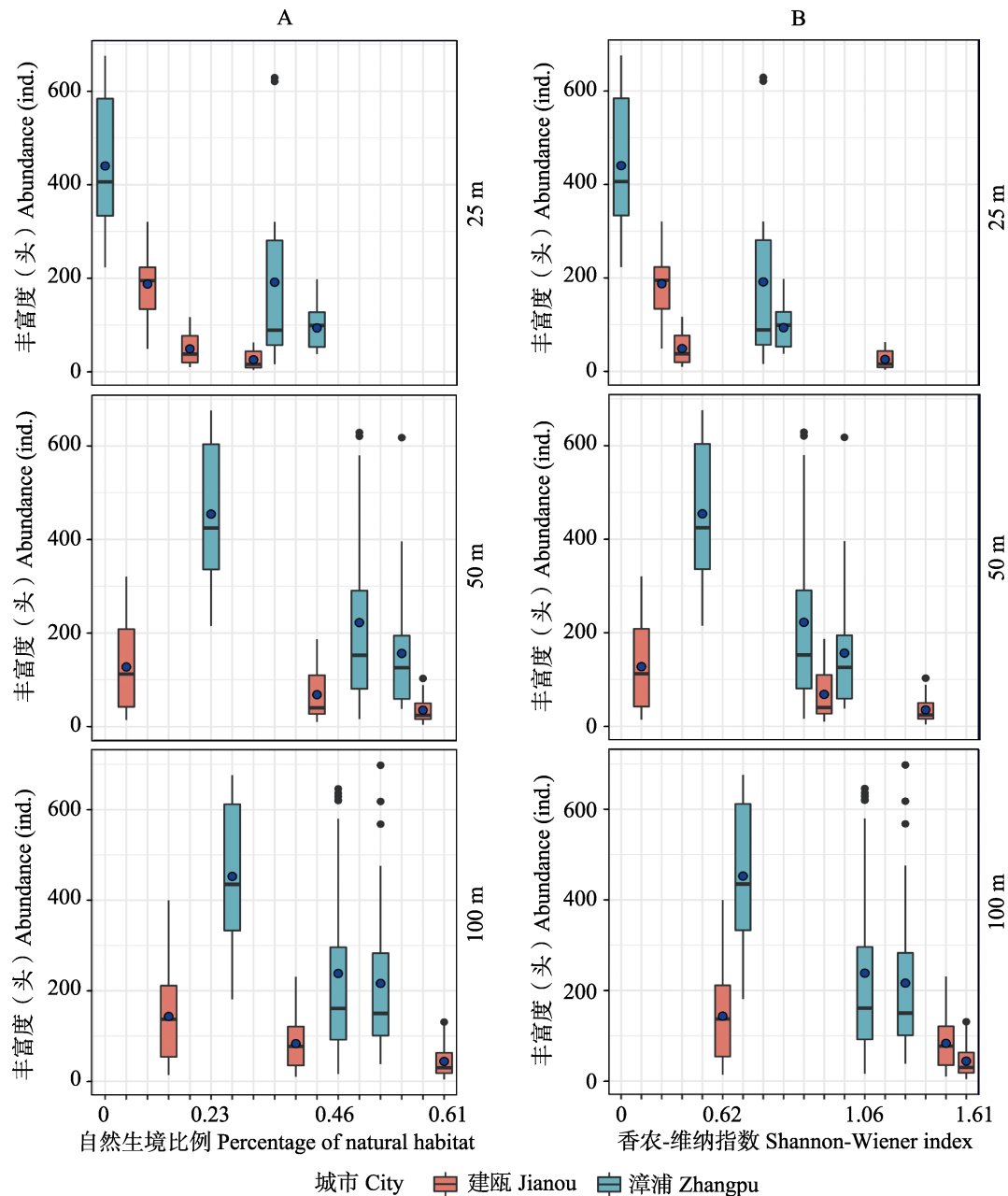


图 4 不同景观多样性下小菜蛾种群丰富度

Fig. 4 The abundance of adult *Plutella xylostella* in different landscapes

A. 不同自然生境比例下种群丰富度; B. 不同香农-维纳指数下小菜蛾种群丰富度。

A. The abundance of *P. xylostella* along different percentage of natural habitat;B. The abundance of *P. xylostella* along the Shannon-Wiener index.

24.235, $P = 0.001$; $F_{2,8} = 40.900$, $P = 0.000$), 分别增长 5.2 倍和 2.3 倍, 说明自然生境比例提高对天敌蜘蛛种群有促进作用。

2.4 影响小菜蛾种群的主要景观因子

由于不同斑块对小菜蛾的影响作用不同, 利

用主成分分析来确定影响小菜蛾的主要影响因子。分析首先排除掉景观中的偶见斑块, 如辣椒, 水稻, 玉米, 大葱和建筑, 只分析各采样点均占有一定比例的常见斑块, 如十字花科作物, 森林, 草地和水域对小菜蛾的影响。结果如图 7, 主成分 1 和主成分 2 共可以解释 80.5% 的变量。其中

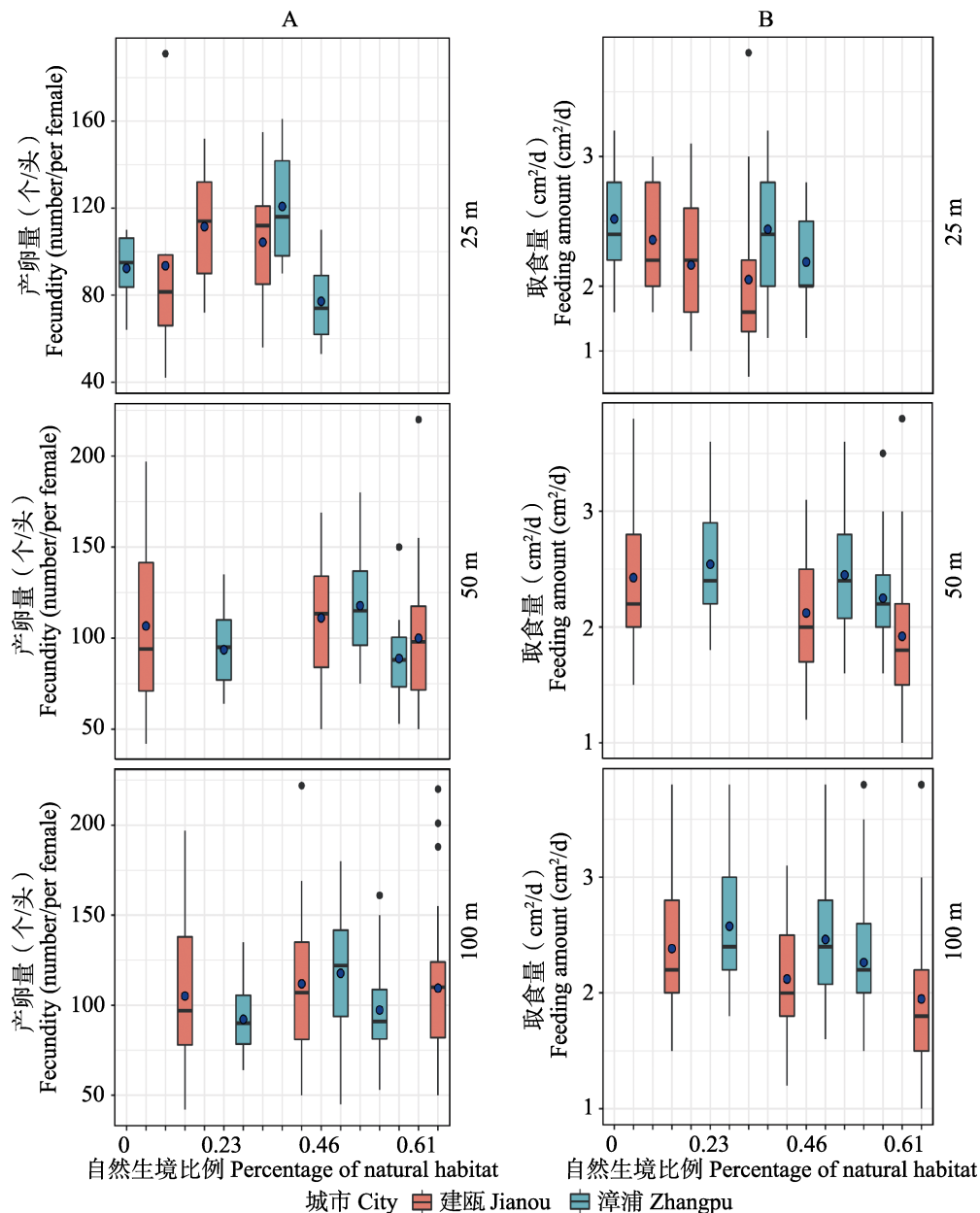


图 5 不同景观多样性条件下小菜蛾产卵量和取食量

Fig. 5 The fecundity and feeding amount of *Plutella xylostella* collected from different landscapes

A. 不同自然生境比例下产卵量变化; B. 不同自然生境比例下取食量变化。

A. The change of fecundity along the percentage of natural habitat;

B. The change of feeding amount along the percentage of natural habitat.

十字花科蔬菜面积与小菜蛾种群丰富度呈正相关关系，森林、草地和水域面积都与小菜蛾种群丰富度都呈负相关关系，其中草地面积与小菜蛾种群丰富度的负相关关系最强。

2.5 小菜蛾种群在田间动态分布

通过测量各诱捕器到自然生境的距离，结

合各点的小菜蛾丰富度进行分析，结果如图 8，小菜蛾种群丰富度随到自然生境距离的增大而升高，到一定距离后不再增长。在漳浦地区，当到自然生境的距离大于 35 m 时，小菜蛾种群趋于稳定，而建瓯地区在距离自然生境 20 m 时，小菜蛾种群也趋于稳定，后缓慢增长。

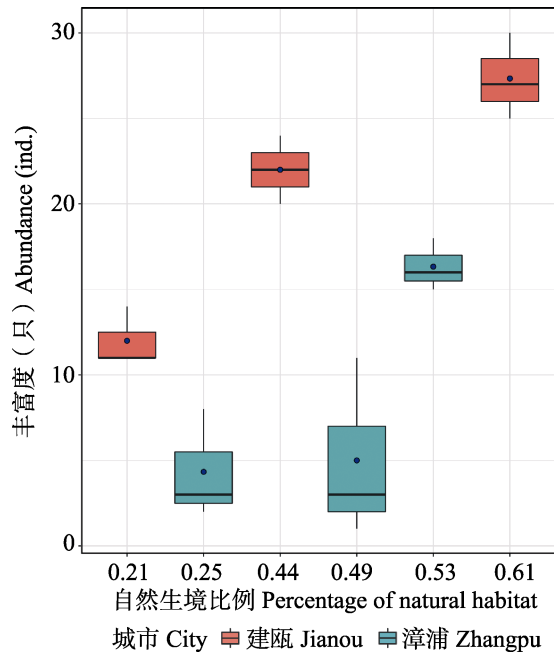


图 6 不同景观多样性条件下蜘蛛丰富度

Fig. 6 The abundance of spiders in different landscapes

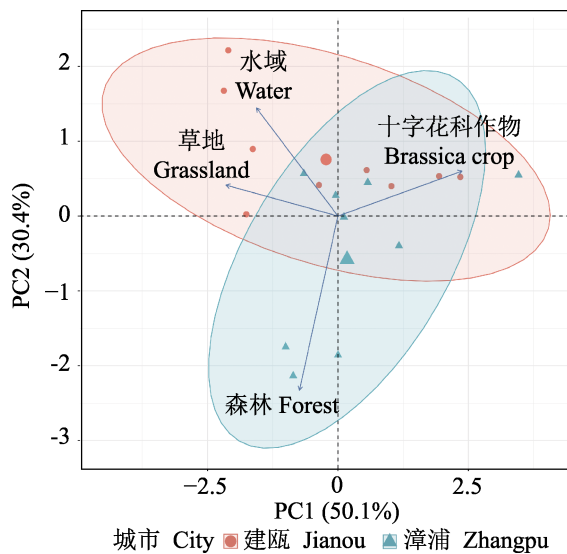


图 7 菜田中不同景观因子的主成分分析

Fig. 7 Principal component analysis for landscape factors in the fields

3 讨论

前人研究表明, 蚜虫种群和橄榄实蝇种群丰富度与自然生境比例和香浓多样性指数呈负相关 (Alignier *et al.*, 2014; Ortega and Pascual, 2014), 同样在本研究中小菜蛾的种群丰富度也随自然生境比例和香浓多样性指数升高都显著

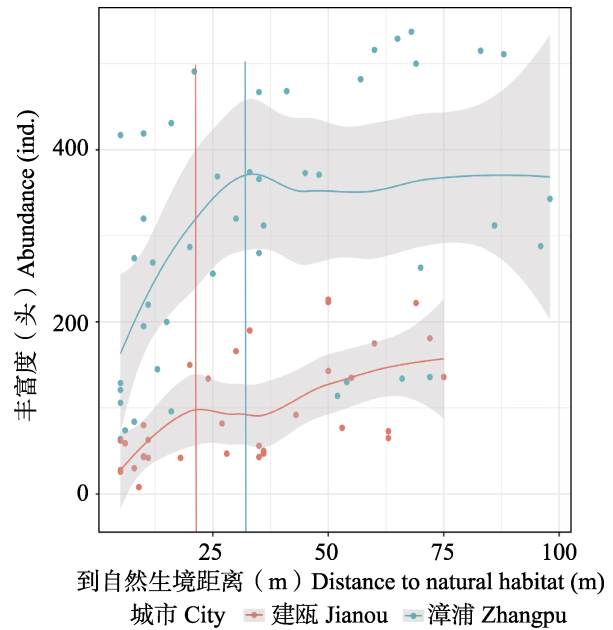


图 8 到自然生境不同距离下的小菜蛾丰富度分布

Fig. 8 The abundance of *Plutella xylostella* along the distance to natural habitats

降低, 表明在小尺度空间范围内, 提高景观多样性有助于加强对小菜蛾的控制。

关于景观多样性影响田间害虫种群的原因多集中于以下方面, 一是“天敌假说”, 认为多样化农业景观能为天敌提供庇护所和冬眠场所, 以及单作系统无法提供的辅助食物, 如花蜜和花粉 (Nwilene *et al.*, 2011; Gurr *et al.*, 2017), 从而维持天敌种群的扩大, 使得多样化农业景观比简单农业景观中具有更为丰富和多样的天敌种群 (Root, 1973)。所以, 多样性高的农业景观具有更强的害虫控制能力。在建瓯与漳浦的田间调查都发现复杂景观中天敌蜘蛛的种群多样性和丰富度显著升高, 说明非作物生境对天敌的重要支持作用。另外, “资源集中假说 (Resource concentration hypothesis)” 认为植食性害虫在单作农田中更易找到寄主植物, 而多样化的景观可能对害虫发现和利用寄主植物的能力产生直接影响。具体体现在“推-拉”策略 (Push-pull strategy) 上, 害虫种群的下降有可能是混作中非目标作物或者菜田周围植物所释放的化学物质对害虫具有诱集或忌避作用 (Shelton and Badenes-Perez, 2006; Mutiga *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2011)。而“信息处理假说 (Information-

processing hypothesis) ”认为, 在面对同时存在的不同寄主释放的相似信号时时, 雌虫会产生寄主选择上的困惑 (Fox and Lalonde, 1993), 小菜蛾上同样存在这种现象, 这种选择上的困难, 增加了活动降低了生殖能力 (黄斌和侯有明, 2014; Huang *et al.*, 2014), 这是“能量权衡”策略 (Trade-off Strategy) 的必然结果 (Huang *et al.*, 2019)。本研究调查发现复杂农业景观显著影响到小菜蛾产卵量 (漳浦地区), 在中等多样性农业景观中小菜蛾产卵量最高, 可能因为小菜蛾受半自然生境中野花资源“吸引”, 获得充足的补充营养。而在复杂农业景观中, 虽然野花资源充足, 但是多样性的植被严重干扰了小菜蛾对寄主及野花资源的选择行为, 小菜蛾付出额外能量用于飞行, 导致用于繁殖的能量减少, 其产卵量显著降低 (Shirai, 1995)。建瓯地区产卵量之间虽没有显著差异性, 但趋势与漳浦地区相似, 可能原因是调查点之间的距离较近。自然生境比例并不影响取食量, 说明景观多样性不会改变小菜蛾的致害性, 田间危害主要与小菜蛾种群丰富度有关。综上所述, 用景观多样性对小菜蛾的控制是一个综合作用的过程, 包括天敌作用、化学信号干扰和能量再分配, 而哪种途径控制作用更大, 需要进一步的研究。

此外, 不同景观因子对小菜蛾种群的影响也是不同的, 通过对各景观因子进行主成分分析发现, 森林、草地、水域都对小菜蛾种群有消极影响, 且草地影响最强。这与前人研究结果相一致 (Gilbert *et al.*, 2017), 草地和森林由于对天敌的支持作用明显 (Gardiner *et al.*, 2009; 赵紫华等, 2012a, 2012b), 可以降低田间害虫种群, 因而表现出较强的害虫控制作用。对欧洲保护性生物防治案例进行综合分析也表明, 草地和线状林地对天敌有最大的支持作用 (Holland *et al.*, 2016)。本研究中草地对小菜蛾的控制作用要明显强于森林与水域, 可能是因为草地不仅可以提供猎物和庇护所等给捕食性天敌, 还可以提供花蜜给寄生性天敌, 同时也是森林中天敌昆虫扩散迁移到作物生境的通道, 所以其支持作用更为重要。但是, 该结论与陈俊晖等 (2016) 对潜叶蝇

的研究结果相反, 其研究表明森林和草地面积对潜叶蝇有积极的支持作用, 原因可能非作物生境对潜叶蝇支持作用更大, 为其提供更多寄主选择, 而非作物生境支撑的天敌种群并不足够对潜叶蝇形成有效控制。因此, 在进行生境管理措施前, 要充分调查自然生境对害虫以及当地天敌的不同作用和程度。

另一方面, 从空间尺度上看, 在距离菜田边缘小于 20 m 的范围内小菜蛾丰富度明显较低, 原因可能是自然生境中天敌的“溢出效应”导致的, 表明在菜田边缘天敌对害虫的“自上而下”控制作用较强。这与田间蚜虫天敌的动态分布相近, 在麦田内距边缘 30 m 范围内, 捕食性天敌和寄生性天敌丰富度最大 (赵紫华等, 2012a)。因此, 在对十字花科蔬菜田进行规划时, 除了提高菜田周围半自然生境比例, 还应注意菜田的空间尺度, 其菜田宽度不应超过 40 m。

本研究表明小尺度范围内利用景观多样性可以提高对小菜蛾的控制, 在未来进行农业景观设计中, 应着重维持或增加草地和田埂等生境面积, 利用有限的土地来最大程度的开发生境的控害潜能。

参考文献 (References)

- Alignier A, Raymond L, Deconchat M, Menozzi P, Monteil C, Sarthou JP, Vialatte A, Ouin A, 2014. The effect of semi-natural habitats on aphids and their natural enemies across spatial and temporal scales. *Biological Control*, 77: 76–82.
- Altieri MA, 1994. Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems. New York: Haworth Press. 185.
- Bird TL, Krüger K, 2006. Response of the polyphagous whitefly *Bemisia tabaci* B-biotype (Hemiptera: Aleyrodidae) to crop diversification-influence of multiple sensory stimuli on activity and fecundity. *Bulletin of Entomological Research*, 96(1): 15–23.
- Bommarco R, Kleijn D, Potts SG, 2013. Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4): 230–238.
- 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 JH, Fu DM, Zou Y, Xiao HJ, Hou LL, Wope W, 2016. Population between agricultural landscape composition and population density of *Chromatomyia horticola* during oil seed

- rape bloom, *Plant Protection*, 42(5): 165–170. [陈俊晖, 付道猛, 邹怡, 肖海军, 侯玲玲, Wope van de Wer, 2016. 油菜花期潜叶蝇的发生与农业景观的关系, 植物保护, 42(5): 165–170.]
- Chisholm PJ, Gardiner MM, Moon EG, Crowder DW, 2014. Tools and techniques for investigating impacts of habitat complexity on biological control. *Biological Control*, 75: 48–57.
- Concepción ED, Díaz M, Baquero RA, 2008. Effects of landscape complexity on the ecological effectiveness of agri-environment schemes. *Landscape Ecology*, 23(2): 135–148.
- Couty A, Emden HV, Perry JN, Hardie JM, Pickett JA, Wadhams LJ, 2006. The roles of olfaction and vision in host-plant finding by the diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Physiological Entomology*, 31(2): 134–145.
- Crowder DW, Jabbour R, 2014. Relationships between biodiversity and biological control in agroecosystems: Current status and future challenges. *Biological Control*, 75: 8–17.
- Fox CW, Lalonde RG, 1993. Host confusion and the evolution of insect diet breadths. *Oikos*, 67(3): 577–581.
- Fu XW, Xing ZL, Liu ZF, Ali A, Wu KM, 2014. Migration of diamondback moth, *Plutella xylostella*, across the Bohai Sea in northern China. *Crop Protection*, 64: 143–149.
- Furlong MJ, Wright DJ, Dosdall LM, 2013. Diamondback moth ecology and management: Problems, progress, and prospects. *Annual Review of Entomology*, 58: 517–541.
- Gardiner MM, Landis DA, Gratton C, DiFonzo CD, O'Neal M, Chacon JM, Wayo MT, Schmidt NP, Mueller EE, Heimpel GE, 2009. Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the north-central USA. *Ecological Applications*, 19(1): 143–154.
- Gibbs M, Dyck VH, 2010. Butterfly flight activity affects reproductive performance and longevity relative to landscape structure. *Oecologia*, 163(2): 341–350.
- Gilbert A, Gauffre B, Parisey N, Gallic JF, Lhomme P, Bretagnolle V, Dedryver CA, Baudry J, Plantegenest M, 2017. Influence of the surrounding landscape on the colonization rate of cereal aphids and phyto virus transmission in autumn. *Journal of Pest Science*, 90(2): 447–457.
- Grab H, Danforth B, Poveda K, Loeb G, 2018. Landscape simplification reduces classical biological control and crop yield. *Ecological Applications*, 28(2): 348–355.
- Gurr GM, Wratten SD, Landis DA, You MS, 2017. Habitat management to suppress pest populations: Progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 62(1): 91–109.
- Higgins PAT, 2007. Biodiversity loss under existing land use and climate change: An illustration using northern South America. *Global Ecology and Biogeography*, 16(2): 197–204.
- Holland JM, Bianchi FJ, Entling MH, Moonen AC, Smith BM, Jeanneret 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 B, Hou YM, 2014. Feasibility of controlling field populations of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae), via host interference. *Acta Entomologica Sinica*, 57(4): 460–465. [黄斌, 侯有明, 2014. 利用寄主干扰效应防控小菜蛾田间种群的有效性. 昆虫学报, 57(4): 460–465.]
- Huang B, Shi ZH, Hou YM, 2014. Host selection behavior and the fecundity of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) on multiple host plants. *Journal of Insect Science*, doi: 10.1093/jisesa/ieul13.
- Huang B, Shi ZH, Hou YM, 2019. Tradeoff between triglyceride consumption and ovariole development in *Plutella xylostella* (L.) released in mixed-host environments. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(4): 167–174.
- Jonsen ID, Fahrig L, 1997. Response of generalist and specialist insect herbivores to landscape spatial structure. *Landscape Ecology*, 12(3): 185–197.
- Letourneau DK, Jedlicka JA, Bothwell SG, Moreno CR, 2009. Effects of natural enemy biodiversity on the suppression of arthropod herbivores in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40(1): 573–592.
- Li ZY, Chen HY, Bao HL, Hu ZD, Yin F, Lin QS, Zhou XM, Wu QJ, Chen AD, Wu YD, Hou YM, He YR, Li JH, Xie SH, Zhang JM, Fu W, Ma CS, Feng X, 2016. Progress in research on managing regional pesticide resistance in the diamondback moth in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(2): 247–255. [李振宇, 陈焕瑜, 包华理, 胡珍娣, 尹飞, 林庆胜, 周小毛, 吴青君, 谌爱东, 吴益东, 侯有明, 何余容, 李建洪, 谢圣华, 章金明, 符伟, 马春森, 冯夏, 2016. 小菜蛾区域性抗药性治理技术研究—公益性行业(农业)科研专项“十字花科小菜蛾综合防控技术与示范推广”研究进展. 应用昆虫学报, 53(2): 247–255.]
- Li ZY, Feng X, Liu SS, You MS, Furlong MJ, 2016. Biology, ecology, and management of the diamondback moth in China. *Annual Review of Entomology*, 61(1): 277–296.
- Liu SS, Li YH, Lou YG, 2006. Non-host plant extracts reduce oviposition of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) and enhance parasitism by its parasitoid *Cotesia plutellae* (Hymenoptera: Braconidae). *Bulletin of Entomological Research*, 96(4): 373–378.
- Mo J, Baker G, Keller M, Roush R, 2003. Local dispersal of the diamondback moth (*Plutella xylostella* (L.))(Lepidoptera: Plutellidae). *Environmental Entomology*, 32(1): 71–79.
- Mutiga SK, Gohole LS, Auma EO, 2010. Effects of integrating companion cropping and nitrogen application on the

- performance and infestation of collards by *Brevicoryne brassicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 134(3): 234–244.
- Nwilene FE, Onasanya A, Togola A, Oyetunji O, 2011. Effect of intercropping maize and cassava with upland NERICA rice varieties on stemborer attack in Southwest Nigeria. *Journal of Entomology*, 8 (5): 417–428.
- Ortega M, Pascual S, 2014. Spatio-temporal analysis of the relationship between landscape structure and the olive fruit fly *Bactrocera oleae* (Diptera: Tephritidae). *Agricultural and Forest Entomology*, 16(1): 14–23.
- Root RB, 1973. Organization of a plain-arthropod association in simple and diverse habitats: The fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs*, 43(1): 95–124.
- Rusch A, Chaplin-Kramer R, Gardiner MM, Hawro V, Holland J, Landis DA, Thies C, Tschamtkke T, Weisser WW, Winqvist C, Woltz M, Bommarco R, 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100(221): 198–204.
- Shelton AM, Badenes-Perez FR, 2006. Concepts and applications of trap cropping in pest management. *Annual Review of Entomology*, 51: 285–308.
- Shirai Y, 1995. Longevity, flight ability and reproductive performance of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae), related to adult body size. *Researches on Population Ecology*, 37(2): 269–277.
- Song B, Zhang J, Hu J, Wu H, Kong Y, Yao Y, 2011. Temporal dynamics of the arthropod community in pear orchards intercropped with aromatic plants. *Pest Management Science*, 67(9): 1107–1114.
- Thies C, Haenke S, Scherber C, Bengtsson J, Bommarco R, Clement LW, Ceryngier P, Dennis C, Emmerson M, Gagic V, Hawro V, Liira J, Weisser WW, Winqvist C, Tschamtkke T, 2011. The relationship between agricultural intensification and biological control: Experimental tests across Europe. *Ecological Applications*, 21(6): 2187–2196.
- Thies C, Steffan-Dewenter I, Tschamtkke T, 2003. Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales. *Oikos*, 101(1): 18–25.
- Thies C, Tschamtkke T, 1999. Landscape structure and biological control in agroecosystems. *Science*, 285(5429): 893–895.
- Togni PHB, Venzon M, Souza LM, Santos JP, Sujii ER, 2019. Biodiversity provides whitefly biological control based on farm management. *Journal of Pest Science*, 92(2): 393–403.
- Tschamtkke T, Tylianakis JM, Rand TA, Didham RK, Fahrig L, Batary P, Bengtsson J, Clough Y, Crist TO, Dormann CF, Ewers RM, Frund J, Holt RD, Holzschuh A, Klein AM, Kleijn D, Kremen C, Landis DA, Laurance W, Lindenmayer D, Scherber C, Sodhi, N, Steffan-Dewenter I, Thies C, Putten WH, Westphal C, 2012. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes-eight hypotheses. *Biological reviews*, 87(3): 661–685.
- Turner MG, 2005. Landscape ecology North America: Past, present, and future. *Ecology*, 86(8): 1967–1974.
- Wu JG, 2007. Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy(2nd edition). Higher Education Press. 13–16. [邬建国, 2007. 景观生态学: 格局、过程尺度与等级(第二版). 高等教育出版社. 13–16.]
- Yang L, Xu L, Liu B, Lu YH, 2016. Effects of landscape pattern on the occurrence of ladybeetles in wheat fields in northern China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(3): 612–620. [杨龙, 徐磊, 刘冰, 陆宴辉, 2016. 农田景观格局对华北地区麦田早期瓢虫种群发生的影响. 应用昆虫学报, 53(3): 612–620.]
- You MS, Hou YM, Liu YF, Yang G, Li ZS, Cai HJ, 2004. Non-crop habitat manipulation and integrated pest management in agroecosystems. *Acta Entomologica Sinica*, 2004. [尤民生, 侯有明, 刘雨芳, 杨广, 李志胜, 蔡鸿娇, 2004. 农田非作物生境调控与害虫综合治理. 昆虫学报, 47(2): 260–268.]
- You MS, Wei H, 2007. Study on the Diamondback Moth. Beijing: China Agricultural Press. 12–14. [尤民生, 魏辉, 2007. 小菜蛾的研究. 北京: 中国农业出版社. 12–14.]
- Zhao S, Song B, Ding SY, Hou XY, Liu XB, Tang Q, Wang R, 2017. Effects of landscape structure and habitat characteristics on spider diversity in the agro-landscape along the lower reaches of the Yellow River. *Acta Ecologica Sinica*, 37(6): 1816–1825. [赵爽, 宋博, 丁圣彦, 侯笑云, 刘晓博, 汤茜, 王润, 2017. 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, 37(6): 1816–1825.]
- Zhao ZH, Ouyang F, He DH, 2012a. Edge effects and spillover effects of natural enemies on different habitat interfaces of agricultural landscape. *Scientia Sinica Vitae*, 42(10): 825–840. [赵紫华, 欧阳芳, 贺达汉, 2012a. 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, 42(10): 825–840.]
- Zhao ZH, Shi Y, He DH, Hang J, Zhao YS, Wang Y, 2010. Population dynamics of wheat aphids in different agricultural landscapes. *Acta Ecologica Sinica*, 30(23): 6380–6388. [赵紫华, 石云, 贺达汉, 杭佳, 赵映书, 王颖, 2010. 不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响. 生态学报, 30(23): 6380–6388.]
- Zhao ZH, Wang Y, He DH, Guan XQ, Xing M, 2012b. Effects of landscape structure and key landscape factors on aphids-parasitoids-hyperparasitoids populations in wheat fields. *Acta Ecologica Sinica*, 32(2): 472–482. [赵紫华, 王颖, 贺达汉, 关晓庆, 辛明, 2012b. 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, 32(2): 472–482.]