

doi: 10.3969/j.issn.1674-0858.2016.06.12

# 两种不同种植方式对龙葵叶片虫食状的影响研究

郝艳平<sup>1</sup>, 王 丁<sup>2\*</sup>, 田旭平<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学林学院, 山西太谷 030801; 2. 河南教育学院生命科学系, 郑州 450046)

**摘要:** 昆虫与植被之间相互关系的深入研究, 有助于更好的理解生态系统结构与功能之间的关系以及生态系统生物多样性维持机理。本文通过对集中种植和分块种植下两种不同种植方式龙葵叶片虫食状进行调查分析, 以期对龙葵的栽培和养护提供理论基础和技术建议。研究结果表明: 龙葵叶片中共识别出 11 种虫食状类型, 其中, 集中种植方式有 10 种, 分块种植方式有 11 种, 各种虫食状类型出现频率在 0.4%–24.7%; 集中种植样地的龙葵叶片虫食状种类数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数均低于分块种植; 分块种植的龙葵叶片受到植食性昆虫的伤害频率较高, 但是集中种植的龙葵叶片受到的伤害程度却明显高于分块种植方式。因此, 种植龙葵应尽量避免大规模集中种植方式, 不同生态系统边界之间边缘效应的尺度和强弱的关系是未来研究的重点和核心问题。

**关键词:** 龙葵; 虫食状; 集中种植; 分块种植; 边缘效应

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2016) 06-1163-07

## Effects of two different planting patterns on insect herbivory pattern of *Solanum nigrum* L. leaves

HAO Yan-Ping<sup>1</sup>, WANG Ding<sup>2\*</sup>, TIAN Xu-Ping<sup>1</sup> (1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi Province, China; 2. Department of Life Sciences, Henan Institute of Education, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** The study of the relationship between insects and vegetation, contributes to a better understanding of the relationship between the structure and function of ecosystems as well as the mechanism of biological diversity maintenance. In this paper, through the investigation and analysis on insect herbivory patterns under centralized planting and block planting two kinds of different planting patterns of *Solanum nigrum*, in order to provide the theoretical foundation and technical advice for cultivation and maintenance of *S. nigrum*. The result showed that 11 insect herbivory patterns were found. There were 10 in centralized planting plots and 11 in Block planting plots. The frequency of each herbivory pattern varied from 0.4%–24.7%. Numbers and Shannon-winner index and Pielou index of insect herbivory pattern in centralized planting plots were lower than that in block planting plots. The frequency of *S. nigrum* leaves by insect herbivory was higher in block planting plots than in centralized planting plots, but the degree of injury of *S. nigrum* leaves in centralized planting plots was significantly higher than in block planting plots. So cultivation of *S. nigrum* should avoid large-scale centralized planting mode. The core issue of the future research should be the relationship of scale and strength of edge effect between different ecosystem boundaries.

基金项目: 山西农业大学科技创新基金 (412579); 河南省重点科技攻关 (142102110123); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划 (2014GGJS-216)

作者简介: 郝艳平, 女, 1979 年生, 山西孟县人, 硕士, 讲师, 研究方向为森林有害生物综合治理, E-mail: 425013393@qq.com

\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: 406914234@qq.com

收稿日期 Received: 2015-12-07; 接受日期 Accepted: 2016-04-27

**Key words:** *Solanum nigrum* L.; insect herbivory pattern; centralized planting; block planting; edge effects

植物与植食性昆虫是陆地生态系统的重要组成部分,其相互关系十分复杂,且这种关系对于生态系统生物多样性的维持和植物群落结构的形成和稳定具有重要作用 (Coley and Barone, 1996)。一方面,由于植食性的昆虫对植物叶片的取食而造成叶片组织的损伤十分普遍 (Cyr and Face, 1993),有研究表明,在温带和热带森林中平均每年大约有 7.5%–10.9% 的植物叶片被昆虫取食 (Coley and Aide, 1991)。植物叶片的损伤不仅会影响到植物的光合作用,导致其竞争能力下降 (Strauss *et al.*, 2001; Avila-Sakar *et al.*, 2003; Thomson *et al.*, 2003),而且对于整个生态系统的群落组成、能量模式、养分元素的循环和植被群落的演替都有着非常重要的影响 (Huntly, 1991; Coley and Barone, 1996; Boege and Marquis, 2005; Schmitz, 2008); 另一方面,植物为了适应这种取食压力,进化出了或物理或化学的防御措施来减少、避免或者补偿这种取食压力 (Coley and Barone, 1996; Hochuli, 1996; Baldwin and Preston, 1999; Fornoni and Juan, 2011)。虫食状 (insect herbivory pattern) 是指,由于昆虫的口器类型和取食行为的不同,而在植物叶片上留下的不同形态和大小的取食痕迹 (于晓东等, 2001)。有研究发现植物叶片虫食状与取食昆虫存在一定对应关系 (于晓东等, 2001; 江红等, 2005),因此通过分析植物叶片的虫食状可间接帮助我们识别昆虫类型,特别是对人工生态系统中的害虫检测有一定指示作用。另外,对于昆虫与植被之间相互关系的深入研究,有助于更好的理解生态系统结构与功能之间的关系以及生态系统生物多样性的维持机理。目前关于植物叶片虫食状的研究大多集中在温带和亚热带地区的森林生态系统中 (于晓东等, 2001; 江红等, 2005; 王宏伟等, 2006; Souza *et al.*, 2013; Nooten and Hughes, 2013),而关于人工生态系统,尤其是人工生态系统中的草本植物的叶片虫食状的研究国内尚未见有报道。

龙葵 *Solanum nigrum* L. 属茄科 *Solanaceae* 茄属 *Solanum*, 一年生草本,常见于荒地、路边与农田地头等地,在我国各地均有分布。龙葵性寒、味苦、微甘、有小毒。现代研究表明 (陈培丰等,

2013; 张卫东等, 2013),龙葵中含有生物碱、皂苷、糖类、氨基酸等多种成分,具有保肝、抗肿瘤等多种作用。另外,魏树和等 (2004, 2005) 研究发现龙葵是 Cd 超积累植物,是较理想的重金属污染地区植物修复资源。本研究通过对两种不同种植方式的龙葵叶片虫食状进行调查和分析,旨在了解龙葵叶片虫食状是否对不同种植方式存在响应,以期对龙葵的栽培和养护提供理论基础和技术建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

实验区设在山西省太谷县山西农业大学苗圃,位于北纬 37°30′,东经 112°,晋中盆地南部,年平均气温 9.8℃,年最低温度 -25.3℃,最高温度 40.2℃,全年平均降雨量 456 mm。实验地土壤属碳酸褐土, pH 范围为 6.0–8.0,腐殖质含量较少,肥力中等,全年无霜期 170 d 左右。

### 1.2 样地设置

实验样地位于山西农业大学苗圃内的龙葵种植区,分为两种种植方式,如图 1 所示, A 为正方形集中成片栽培,正方形样地边长为 10 m, B 为分块栽培,把边长为 10 m 的正方形样地分割成 16 个边长为 2 m 的小正方形地块,每两个正方形地块之间间隔约 0.6 m。每种种植方式均有 3 个重复,重复之间间隔大于 3 m。两种方式栽培密度一致均为 15 株/m<sup>2</sup>。

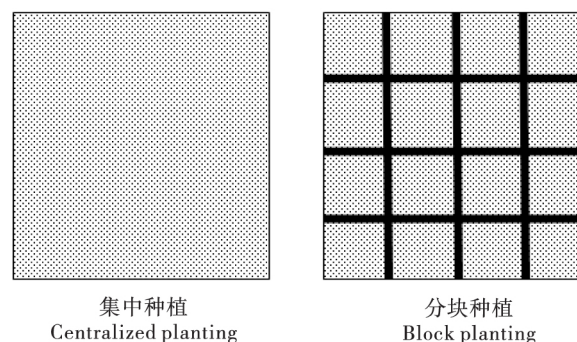


图 1 龙葵两种不同栽培方式示意图

Fig. 1 Two different cultivation methods of *Solanum nigrum*

1.3 龙葵育苗

试验用龙葵种子购于河南洛阳,育苗前先用 10% 酒精进行消毒处理,然后用浮选法去除杂质和无用种子,于 2013 年 4 月上旬在温室内育苗,具体步骤如下:首先在育苗盘上铺上 5 cm 厚的底土,然后把龙葵种子均匀撒在育苗盘上,然后复土约 1 cm 厚度,浇水保持土壤湿润,待龙葵幼苗长至约 5 cm 移栽到设置好的试验田中。

1.4 叶片采集

取样在 2013 年 10 月上旬进行,此时龙葵植株生长良好,株高多数集中在 80 cm。分块种植样地中每个小样地随机采集 5 株龙葵植株,共 80 株,集中种植样地按照 B 样地相同部位随机采集龙葵植株共 80 株,然后将采集的苗木叶片全部采摘带回实验室分析观察。

1.5 叶片虫食状的鉴定

昆虫取食叶片后在叶片上留下各种不同的取食痕迹,根据留下的痕迹大小、形状、位置和排列进行识别、分类。对少数难区别的类型采取多人鉴定与参考文献(于晓东等,2001;江红等,2005)的方法。

1.6 虫食频率的测定

虫食频率(%) = 某种虫食状所占叶片数 / 所有虫食状所占叶片总数 × 100

1.7 叶片虫食状多样性分析

为反映每种植物叶片虫食状在类型和出现频

率上的综合差异,本文选择多样性指数(Shannon-Wiener 指数)和均匀性指数(Pielou 指数)来加以度量。

Shannon-Wiener 指数  $H$  计算方法为:

$$H = -\sum P_i \ln P_i$$
, 式中  $P_i = N_i / N$

式中  $P_i$  是第  $i$  种虫食状类型在所有虫食状类型中的比例, $n$  是虫食状类型总数。

Pielou 指数计算方法为:  $E = H / \ln S$

式中  $H$  为样地中的虫食状多样性指数, $S$  为样地中总的虫食状类型总数。

1.8 叶片取食强度测定

通过单位网格纸(10 格/cm<sup>2</sup>)和叶面积仪(Laser Area Meter CI-203)相结合,分别对叶片整体面积和各种虫食状面积进行测量。

叶片虫食强度(%) = 虫食所占叶片面积 / 全部叶片总面积 × 100

本文所有数据均在 Excel 2010 软件中做统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 叶片昆虫取食类型及出现频率

在采摘的龙葵叶片中共识别出 11 种虫食类型分别为:缘食状、掏食状、阳面食状、阴面食状、小孔状、大孔状、切叶状、叶中脉状、潜叶状、褶皱状、顶食状(见表 1)。

表 1 不同种植方式样地龙葵叶片昆虫取食状类型及其出现频率  
Table 1 Insect herbivory patterns and frequency of *Solanum nigrum* leaves under different planting patterns

虫食状类型 Insect herbivory patterns	集中种植 Centralized planting	分块种植 Block planting
缘食状 Edge defoliation	3.8	7.7
掏食状 Excavating defoliation	5.6	8.6
阳面食状 Upper epidermis defoliation	15.5	10.5
阴面食状 Lower epidermis defoliation	13.2	12.9
小孔状 Small perforation	23.5	11.9
大孔状 Big perforation	24.7	14.6
切叶状 Leaf cutting	5.3	6.6
叶中脉状 Middle vein defoliation	3.2	6.5
褶皱状 Rugate defoliation	4.8	8.4
潜叶状 Leaf mine	0	6.6
顶食状 Top defoliation	0.4	5.7

龙葵两种不同种植方式,其叶片虫食状类型频率分布不同,其中集中种植方式样地中,虫食状类型为 10 种,而分块种植方式中虫食状类型为 11 种(表 1)。在两种不同种植方式样地中,阳面食状、阴面食状、小孔状和大孔状最为常见,出现频率均超过 10%,在集中种植方式样地中,这 4 种取食类型频率之和为 76.9%,分块种植方式样地中这 4 种取食方式频率之和为 49.9%。集中种植方式取食类型最多的为大孔状,取食频率为 24.7%,其次为小孔状频率为 23.5%,取食频率最小的为潜叶状频率为 0,而分块种植方式取食类型最多的为大孔状频率为 14.6%,其次为阴面食状频率为 12.9%,取食频率最小的为顶食状,频率为 5.7%。

表 2 不同种植方式样地龙葵叶片昆虫取食状类型的多样性

Table 2 *Solanum nigrum* leaves diversity of insect herbivory patterns under different planting patterns

种植方式 Planting pattern	虫食状种类数 Number of insect herbivory patterns	Shannon-Wiener 指数 Index of Shannon-Wiener	Pielou 均匀度指数 Index of Pielou
集中种植 Centralized planting	10	2.83	0.85
分块种植 Block planting	11	3.32	0.98

### 2.3 不同样地龙葵叶片受损率比较

植物叶片受损频率为受损伤叶片占全部叶片的比率。它可以反映植物种群受昆虫取食压力的大小。两种不同种植方式样地龙葵叶片受损频率情况见图 2。

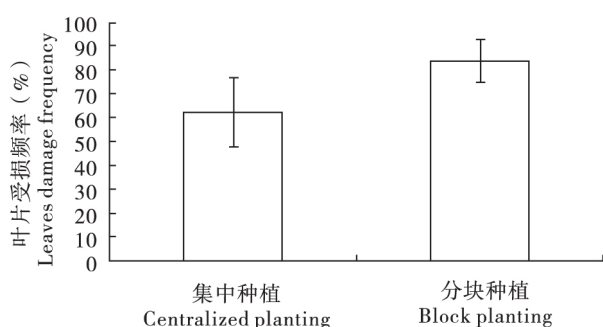


图 2 不同种植方式龙葵叶片受损频率比较

Fig. 2 Leaves damage frequency of *Solanum nigrum* under different planting patterns

分块种植方式的龙葵叶片受损频率明显高于集中种植方式 ( $P=0.02$ ) (图 2)。集中种植的龙葵有 62.2% 的叶片收到昆虫不同程度的取食,而分块种植的龙葵有高达 83.6% 的叶片受到昆虫取食。这说明相比集中种植,分块种植的龙葵更容易收到昆虫的取食伤害。

### 2.2 不同样地龙葵叶片昆虫取食状类型的多样性分析

为反映不同种植方式龙葵叶片虫食状在类型和出现频率上的综合差异,本文选择 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数来反映样地间的差异。由表 2 可知,集中种植的龙葵叶片虫食状 Shannon-Wiener 指数为 2.82, Pielou 均匀度指数为 0.85,而分块种植的龙葵叶片虫食状 Shannon-Wiener 指数为 3.32, Pielou 均匀度指数为 0.98,集中种植的龙葵叶片虫食状种类数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数均低于分块种植。

### 2.4 龙葵叶片昆虫取食强度分析

本文将昆虫取食强度作如下分级: (1) 0 级 (未取食), 叶片无昆虫取食痕迹; (2) 1 级 (轻度取食), 指叶片被昆虫取食面积占整个叶片面积的 0–10%; (3) 2 级 (中度取食), 指叶片被昆虫取食面积占整个叶片面积的 10%–40%; (4) 3 级 (重度取食), 指叶片被昆虫取食面积占整个叶片面积大于 40%。

两种不同种植方式条件下,龙葵叶片的 3 种不同取食强度的频率均差异显著 ( $P<0.01$ )。分块种植条件下,轻度取食和中度取食的频率分别为 7.8% 和 43.2%,集中种植的龙葵叶片被昆虫轻度和中度取食的频率为 3.8% 和 23%,分块种植方式明显高于集中种植方式,而重度取食频率则集中种植方式 (73.2%) 明显高于分块种植方式 (49%) (图 3)。

## 3 讨论与结论

### 3.1 昆虫取食状类型与多样性

在自然界中,以植物为食的动物主要有哺乳动物和昆虫两大类群,其中昆虫对陆地生态系统的多样性和稳定性的维持具有重要作用 (Coley

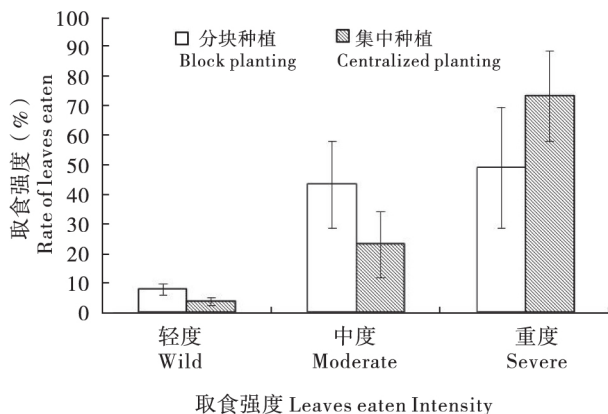


图3 不同种植方式龙葵叶片取食强度比较

Fig. 3 Leaves eaten intensity of *Solanum nigrum* under different planting patterns

and Barone, 1996)。昆虫在长期的进化过程中形成了多种多样的生活方式和口器类型。对于植食性昆虫而言, 根据其口器的类型和取食方式的不同又可分为咀嚼类、刺吸类、钻蛀类、潜叶类和造瘿类, 能在叶片上留下明显虫食状痕迹的主要为咀嚼式口器昆虫。在具有咀嚼式口器的昆虫中, 由于其生活环境和发育阶段的不同, 取食叶片后会在植物叶片上留下大小不一、形状各异的取食痕迹即昆虫取食状, 因此有学者认为可以通过对植物叶片取食状的分析来初步认识植食性昆虫的类型 (于晓东等, 2001; 江红等, 2005; 王宏伟等, 2006), 在一定程度上可以反映植物群落植食性昆虫的多样性状况。如于晓东等通过对北京西部灵山地区辽东栎叶片的昆虫取食状况研究, 把取食状分为 9 类, 同时记录了 20 余种植食性昆虫 (于晓东等, 2001)。而江红等 (2005) 通过对浙江天童山常绿阔叶林石栎叶片的昆虫取食状类型和取食强度的研究, 共识别出 15 种取食状类型。范旭东 (2007) 通过对浙江千岛湖地区苦槠叶片的昆虫取食状类型的研究, 共识别出 16 种取食类型。陈凌等 (2008) 通过对福建梅花山 17 中常绿阔叶植物叶片充实状况的研究, 共识别出 15 种虫食状类型。本次研究中两种不同种植方式龙葵叶片的虫食状类型共识别出 11 种虫食状类型, 低于江红 (2005) 和陈凌 (2008) (15 种) 及范旭东 (2007) (16 种) 的研究结果而高于于晓东 (2001) (9 种) 的研究结果。这是由于本次的研究地处温带地区, 植食性昆虫的多样性状况均比处于亚热带地区的浙江和福建小很多, 而于晓东 (2001)

在更高纬度的北京灵山地区仅发现了 9 种昆虫虫食状类型。另外, 昆虫对植物叶片的取食与植物叶片的生长发育阶段密切相关。例如, 植食性昆虫更偏好在植物叶片生长发育的早期阶段取食, 这可能与叶片的革质化程度、单宁含量的多少以及叶片的适口性有关 (Coley and Barone, 1996)。

### 3.2 不同种植方式对昆虫取食状的影响

本次研究发现, 龙葵两种不同种植方式, 其叶片受到植食性昆虫的危害类型及强度明显不同。首先, 分块种植的龙葵叶片虫食状类型多于集中种植, 这说明分块种植的样地中有更多的植食性昆虫危害, 分块种植的龙葵叶片有高达 83.6% 的叶片受到植食性昆虫的伤害, 而集中种植的龙葵叶片仅有 62.2% 受到昆虫取食也说明这一点。究其原因, 可能是由于相对于集中种植, 分块种植的样地有更多的边缘面积而边缘效应显著所致。边缘效应是指在两个不同生态系统的交界处, 由于生态因子或者系统属性的差异而造成的系统界面上的某些生物因子产生较大变化 (马世骏, 1990), 如一些学者的研究表明在森林的边缘, 植物、鸟类、哺乳动物和小型无脊椎动物的多样性和多度均要高于森林内部 (Bider, 1968; Toda, 1992; 奚为民等, 1993; Casenave *et al.*, 1995; Larue *et al.*, 1995)。另外, 赵紫华等 (2012) 通过对农业景观中不同生境界面麦蚜天敌的边缘效应的研究, 发现在麦田界面上无论是天敌的物种数还是个体数均显著高于麦田内部, 存在明显的边缘效应。其次, 虽然分块种植的龙葵叶片受到植食性昆虫的伤害频率较高, 但是集中种植的龙葵叶片受到的伤害程度却明显高于分块种植方式, 例如, 在集中种植样地中阳面食状、阴面食状、小孔状和大孔状这 4 种取食类型频率之和达 76.9%, 而在分块种植样地中这 4 种虫食类型频率之和为 19.9%, 同样在集中种植的样地龙葵被昆虫取食的叶片有高达 73.2% 的叶片受到重度取食, 而在分块种植的样地中重度取食仅为 49%。这是由于在农业生态系统中, 微环境和物种高度集中和单一, 一旦条件成熟极易造成某少数害虫爆发式增长, 而农田边缘由于小气候的异质性增加导致生物多样性的增大, 使得处在边缘的作物病虫害发生率明显低于中心地带的作物 (戈峰等, 2004; 赵紫华等, 2012)。因此, 在龙葵种植的实践操作中应尽量避免大规模集中种植方式, 然而过度的片段化和破碎化种植同样也会导致生物多



样性的减少(扎史其和格玛江初,2013) 且又有管护成本增高、不易机械化操作等缺点,所以不同生态系统边界之间边缘效应的尺度和强弱的关系就成为未来研究的核心问题。

### 参考文献 (References)

- Avila-Sakar G, Leist LL, Stephenson AG. Effects of the spatial pattern of leaf damage on growth and reproduction: Nodes and branches [J]. *Journal of Ecology*, 2003, 91 (5): 867–879.
- Baldwin T, Preston CA. The eco-physiological complexity of plant responses to insect herbivores [J]. *Planta*, 1999, 208 (2): 137–145.
- Bider JR. Animal activity in uncontrolled terrestrial communities as determined by a sand transect technique [J]. *Ecological Monographs*, 1968, 38 (4): 269–308.
- Boege K, Marquis RJ. Facing herbivory as you grow up: The ontogeny of resistance in plants [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20 (8): 441–448.
- Casenave JLD, Pelotto JP, Protomastro J. Edge-interior differences in vegetation structure and composition in a Chaco semi-arid forest, Argentina [J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, 72 (1): 61–69.
- Chen L, Cai YL, Li K, et al. Insect herbivory patterns on leaves of 17 plant species in the evergreen broad-leaved forests of Mt. Meihuashan, Fujian Province [J]. *Subtropical Plant Science*, 2008, 37 (1): 1–5 [陈凌, 蔡永立, 李恺, 等. 福建梅花山 17 种常绿阔叶植物叶片虫食状况 [J]. 亚热带植物科学, 2008, 37 (1): 1–5]
- Chen PF, Gao JW, Pan L. Selection of different extractants of *Solanum nigrum* L. by different cancer cell lines in vitro [J]. *Zhejiang Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2013, 48 (7): 540–541. [陈培丰, 高聚伟, 潘磊. 龙葵不同提取物体外抗癌活性部位筛选 [J]. 浙江中医杂志, 2013, 48 (7): 540–541]
- Coley PD, Aide TM. Comparison of Herbivory and Plant Defenses in Temperate and Tropical Broad-leaved Forests [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991: 25–49.
- Coley PD, Barone JA. Herbivory and plant defenses in tropical forests [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1996, 27 (1): 305–335.
- Cyr H, Face ML. Magnitude and patterns of herbivory in aquatic and terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 1993, 361 (6408): 148–150.
- Fan XD, Ji YS, Ling JJ, et al. Intensity and patterns of castanopsis sclerophylla leaf eaten by insects, at Qiandao lake, Zhejiang [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23 (4): 1–5. [范旭东, 冀永生, 凌旌瑾, 等. 浙江千岛湖地区苦槠叶片昆虫取食状类型和取食强度研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23 (4): 1–5]
- Fornoni J. Ecological and evolutionary implications of plant tolerance to herbivory [J]. *Functional Ecology*, 2011, 25 (2): 399–407.
- Ge F, Men XY, Su JW, et al. Edge effect on the dynamics of pests and natural enemies in cotton agroecosystems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (1): 91–94. [戈峰, 门兴元, 苏建伟等. 边缘效应对棉田害虫和天敌种群的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (1): 91–94]
- Huntly N. Herbivores and the dynamics of communities and ecosystems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1991, 22: 477–503.
- Hochuli DF. The ecology of plant/insect interactions: Implications of digestive strategy for feeding by phytophagous insects [J]. *Oikos*, 1996, 75 (1): 133–141.
- Jiang H, Cai YL, Li K, et al. Intensity and patterns of leaf area eaten of *Lithocarpus glaber* by insects, at Tiantong Forest Park Zhejiang [J]. *Journal of Ecology*, 2005, 24 (9): 989–993. [江红, 蔡永立, 李恺等. 浙江天童常绿阔叶林石栎叶片昆虫取食状类型和取食强度研究 [J]. 生态学杂志, 2005, 24 (9): 989–993]
- Larue P, Belanger I, Huet J. Riparian edge effects on boreal balsam fir bird communities [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25 (4): 555–566.
- Ma SJ. Edge Effect and Edge Ecology. Modern Ecology Review [M]. Beijing: Science & Technology Press, 1990: 43–45. [马世骏. 边际效应与边际生态学. 现代生态学透视 [M]. 北京: 科技出版社, 1990: 43–45]
- Nooten SS, Hughes L. Patterns of insect herbivory on four Australian understory plant species [J]. *Australian Journal of Entomology*, 2013, 52 (4): 309–314.
- Schmitz OJ. Herbivory from individuals to ecosystems [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 133–152.
- Souza DG, Santos BA, Wirth R, et al. Community-level patterns of insect herbivory in a fragmented atlantic forest landscape [J]. *Environmental Entomology*, 2013, 42 (3): 430–437.
- Strauss SY, Conner JK, Lehtilä KP. Effects of foliar herbivory by insects on the fitness of *Raphanus raphanistrum*: Damage can increase male fitness [J]. *The American Naturalist*, 2001, 158 (5): 496–504.
- Toda MJ. Three-dimensional dispersion of drosophilid flies in a cool temperate forest of northern Japan [J]. *Ecological Research*, 1992, 7 (3): 283–295.
- Thomson VP, Cunningham SA, Ball MC, et al. Compensation for herbivory by *Cucumis sativus* through increased photosynthetic capacity and efficiency [J]. *Oecologia*, 2003, 134 (2): 167–175.
- Wang HW, Cai YL, Li K, et al. Insect herbivory patterns on leaves of 11 plant species in the evergreen broad-leaved forests of Tiantong National Forest Park, Zhejiang [J]. *Biodiversity Science*, 2006, 14 (2): 145–151. [王宏伟, 蔡永立, 李恺, 等. 2006. 浙江天童常绿阔叶林中 11 种常绿乔灌木叶片虫食状分析 [J]. 生物多样性, 2006, 14 (2): 145–151]
- Wei SH, Zhou QX, Wang X, et al. A newly discovered Cadmium-Hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (24): 2568–2573. [魏树和, 周启星,

- 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49 (24): 2568–2573]
- Wei SH, Zhou QX, Wang X. Cadmium-Hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics [J]. *Environmental Science*, 2005, 26 (3): 167–171. [魏树和, 周启星, 王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征 [J]. 环境科学, 2005, 26 (3): 167–171]
- Xi WM, Zhong ZC, Bi RC. The study of edge effect of the forest communities in Jinyun Mountain [J]. *Journal of Plant Ecology and Geobotany*, 1993, 17 (3): 232–242. [奚为民, 钟章成, 毕润成. 四川缙云山森林窗边缘效应的研究 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17 (3): 232–242]
- Yu XD, Zhou HZ, Luo TH. Patterns of damage by phytophagous insects on leaves of *Quercus liaotungensis* [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2001, 25 (5): 553–560. [于晓东, 周红章, 罗天宏. 辽东栎叶片昆虫取食形状多样性及其变化模式 [J]. 植物生态学报, 2001, 25 (5): 553–560]
- Zhang WD, Xu L, Liu DP, et al. Study of nutrient composition of *Solanum nigrum* plant [J]. *Heilongjiang Science*, 2013, 4 (9): 60–61. [张卫东, 许龙, 刘东璞, 等. 龙葵植物营养成分的研究进展 [J]. 黑龙江科学, 2013, 4 (9): 60–61]
- Zhao ZH, Ouyang F, He DH. Edge effect and overflow effect of natural enemies of wheat aphid in different habitats within agricultural landscapes [J]. *Science China: Life Sciences*, 2012, 42 (10): 825–840. [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]
- Zha SQ, Gema JC. Effect of landscape fragmentation on animals fitness [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2013, 38 (6): 27–30. [扎史其, 格玛江初. 景观破碎化对动物适合度的影响研究综述 [J]. 林业调查规划, 2013, 38 (6): 27–30.]