

我国壁蜂传粉的作物种类与生态效益*

欧阳芳^{1**} 门兴元² 肖治术^{1***}

(1. 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;

2. 山东省农业科学院植物保护研究所, 山东省植物病毒学重点实验室, 济南 250100)

摘要 【目的】过去 30 年来, 中国及全球农业对传粉昆虫的依赖度越来越高, 但社会性驯养蜜蜂数量 (如蜜蜂和熊蜂等) 及传粉服务能力远远不足。中国超过 70% 的主要农作物在果实和种子生产过程中非常依赖蜂类等昆虫的传粉功能。其中, 蜜蜂总科中的壁蜂 *Osmia* spp. 是重要的独栖性传粉昆虫, 可通过人工繁育来为作物授粉, 以提高作物的产量和质量。然而, 目前壁蜂在我国农作物生产的应用研究状况如何, 有待系统的梳理总结。【方法】结合定性和定量的文献调研方法分析我国壁蜂对农作物传粉的研究进展。【结果】文献分析结果表明目前我国作物传粉应用较多的主要壁蜂物种有凹唇壁蜂 *O. excavata*、角额壁蜂 *O. cornifrons*、紫壁蜂等 *O. jacoti* 等; 壁蜂传粉的主要作物类型为水果作物、蔬菜、纤维作物和油料作物等; 壁蜂传粉在提高作物坐果率和产量、改善品质、减少生理落果和提高繁育种子质量等方面产生了明显的生态效益和功效作用。【结论】明确壁蜂传粉的作物类型及其生态效益的定量评估指标, 为全国范围内加快推广应用壁蜂传粉和满足农作物生产对昆虫传粉的需求提供科学依据。

关键词 壁蜂传粉; 生态效益; 作物类型; 作物产量; 作物品质

The ecological benefits of mason bee pollination in China

OUYANG Fang^{1**} MEN Xing-Yuan² XIAO Zhi-Shu^{1***}

(1. State Key Laboratory of Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Shandong Provincial Key Laboratory of Plant Virology, Jinan 250100, China)

Abstract 【Objectives】Over the past 30 years, agricultural production in China and around the world has become increasingly dependent on pollinators, but there are insufficient socially domesticated bees (such as honeybees and bumblebees) to provide the required pollination services. About 70% of the major crops in China rely heavily on insect pollinators for fruit and seed production. The mason bee (*Osmia*) in the super family Apoidea is an important solitary pollinator, which, through artificial breeding, can improve crop yield and quality. However, there is currently no systematic summary of the benefits of mason bees to crop production in China. 【Methods】Qualitative and quantitative literature searches were combined to obtain information on the effectiveness of using mason bees as crop pollinators in China. 【Results】Currently, the major mason bee species used for crop pollination mainly include *O. cornifrons*, *O. excavata* and *O. jacoti*. Crops pollinated by mason bees include fruits, vegetables, fibre crops and oil crops. Pollination by Mason bees has significant ecological benefits and can improve fruit size, yield and quality, reduce physiological fruit drop, and improve the quantity and quality of seed crops. 【Conclusion】This paper provides a summary of the crops pollinated by mason bees in China and a quantitative evaluation of the ecological benefits of using Mason bees for pollination. This information should promote the use of Mason bees as pollinators and thereby help rectify the nationwide shortage of insect pollinators.

Key words mason bee pollination; ecological benefit; crop type; crop yield; crop quality

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1301801); 农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题 (NGSB-2021-15-04); 国家林业和草业局-中国科学院 国家公园研究院专项

**第一作者 First author, E-mail: ouyangf@ioz.ac.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: xiaozs@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2022-08-09; 接受日期 Accepted: 2022-10-11

昆虫传粉是重要的生态功能, 为人类的生存与生产提供服务, 在维持农业生态系统功能稳定和农产品的供给中发挥重要的作用。维持农作物与昆虫传粉的供需平衡关系, 是农业生态系统作物安全生产和人类食物供给的重要保障。传粉昆虫的主要类群包括膜翅目蜜蜂总科昆虫, 按照生活方式、行为习性和生活史等特征, 蜜蜂总科传粉昆虫分为社会性传粉蜂(如蜜蜂和熊蜂等)与独栖性传粉蜂(如切叶蜂科野生传粉昆虫)(Michener, 2007)。Dicks 等(2021)从全球和各洲空间尺度研究了传粉昆虫的物种数量和种群数量下降的驱动因素, 发现导致授粉物种减少的主要原因包括栖息地破坏、土地管理不当(包括过度放牧、施肥和农作物单一种植)、杀虫剂的大量使用、气候变化等, 而传粉昆虫数量下降的直接风险是作物授粉不足, 导致粮食和生物燃料作物的数量和质量下降。

过去 30 年, 中国及全球农业对传粉昆虫的依赖度越来越高, 但社会性驯养蜜蜂数量(包括蜜蜂和熊蜂等)及传粉服务能力远远不足(Mashilingi *et al.*, 2022)。欧阳芳等(2019)系统分析了中国 107 种主要农作物花的结构和类型, 授粉过程、授粉媒介和授粉方式, 以及作物对昆虫传粉的依赖程度等特征, 发现超过 70% 的主要农作物在果实和种子形成过程中依赖昆虫传粉, 其中 25.0% 的粮食作物、85.4% 的果树作物、82.6% 的蔬菜作物和 78.9% 的经济作物依赖昆虫传粉(欧阳芳等, 2019)。因此, 中国农作物生产对昆虫传粉具有巨大需求, 同时面临授粉严重不足的风险。

壁蜂是重要的独栖性传粉昆虫, 在我国壁蜂已经成为作物授粉的重要媒介(门兴元等, 2018)。壁蜂是蜜蜂总科 Apidae 切叶蜂科 Megachilidae 壁蜂属 *Osmia* 物种的统称。全球壁蜂属至目前为止记录 360 多个物种(Orr *et al.*, 2021), 其中我国范围内目前记录的壁蜂属 36 个物种(吴燕如, 2006), 在自然生态系统和农田生态系统中均发挥着重要的传粉生态功能。壁蜂在开花作物上取食或者采集花蜜和花粉过程中, 同时将作物雄蕊花药或小孢子囊中散出后的成熟花粉, 传送到同一朵或者不同朵花的雌蕊柱头

或胚珠上, 雄配子借花粉管与雌配子体结合, 使植物受精并结实。壁蜂独居筑巢、以植物花粉为主要食物、接受人类提供的巢穴、一年一代的习性, 使它们很容易被大量饲养, 并且人们可以通过调节其在春节破茧羽化的时间与作物花期同步, 为多种目标作物授粉。

国内外研究和利用壁蜂给作物授粉经历了一定的历史发展过程。据文献记载, 早在 20 世纪 50 年代末, 日本开始研究利用野生壁蜂授粉, 经过此后 20 年多年的发展, 本地物种角额壁蜂 *Osmia cornifrons* 已在日本中部和北部得到普遍应用, 并对苹果、梨、桃、李、樱桃等作物授粉作用显著, 成功地代替了人工授粉的繁重劳动(周伟儒等, 1990)。美国和欧洲各国为了满足果园种植业不断发展的需要, 在 70 年代初期从日本引进角额壁蜂为苹果授粉, 取得很好效果。同时, 美国还对本国收集的壁蜂种类开展了授粉研究与应用。我国于 1987 年从日本引入角额壁蜂(王宝义, 1989; 魏枢阁和王韧, 1990; 赵兰英等, 1990), 并在我国北方果园种植地区得到应用(周伟儒等, 1990), 然而在应用角额壁蜂的过程中, 其他多种本地壁蜂物种如凹唇壁蜂 *O. excavata*、紫壁蜂 *O. jacoti*、叉壁蜂 *O. pedicornis*、壮壁蜂(*O. taurus* 也被发掘、繁育与应用(吴燕如, 1990, 2004; 周伟儒, 2002)。我国从开始应用壁蜂授粉至今, 对壁蜂传粉的应用状况缺乏系统的梳理。

本文通过文献综述分析了壁蜂在中国农作物生产上的基本应用状况, 包括目前主要壁蜂物种、应用壁蜂传粉的主要作物类型以及提高作物坐果率和产量、改善品质、减少生理落果和提高繁育种子质量等方面的生态效益。本文为全国范围内加快推广应用壁蜂传粉和满足农作物生产对昆虫传粉的需求提供科学依据。

1 研究方法

本研究将定性的文献调研、专家访谈与定量的文献计量方法相结合, 对壁蜂传粉在中国应用现状进行分析。通过文献分析, 了解我国农作物授粉的主要壁蜂物种、壁蜂传粉的主要作物类型以及壁蜂传粉对作物的生态效应。

1.1 数据来源

文献数据以中国知网数据库 CNKI (China National Knowledge Internet, <https://www.cnki.net/>) 为主要资料来源, 学术期刊论文出版时间限定为 2022 年及之前的所有文章。

1.2 文献检索

以“壁蜂”为检索词, 以篇名、关键词和摘要为检索式, 检索获得的学术论文从 1955 年到 2022 年 7 月 20 日共有 496 篇候选文章, 不包括学位论文和会议论文。

1.3 文献筛选

以检索到的候选文章为基础, 选择文献类型以实验性研究文章为主, 文章内容中有明确的壁蜂物种、壁蜂授粉的作物对象、定量的生态效益评估指标等, 满足条件的代表性目标文献有 72 篇。

1.4 文献分析

依据最终得到的目标文献, 分析出我国壁蜂传粉的主要物种种类和作物物种种类, 见表 1,

具体字段关键词包括作物物种种类、作物分类地位、壁蜂物种种类和参考文献; 进一步分析不同作物特性与壁蜂传粉对作物生产的生态效益, 见表 2, 具体字段关键词包括作物特性、生态效益、评估指标、研究案例和参考文献。

2 结果与分析

2.1 壁蜂传粉的作物类型

本文通过分析 2022 年及之前发表的有关壁蜂传粉的文献, 结果表明: 我国应用壁蜂传粉的物种主要种类包括凹唇壁蜂、角额壁蜂和紫壁蜂等 (表 1)。我国应用壁蜂传粉的主要作物包括水果、蔬菜、纤维作物和油料作物等 (表 1)。其中, 水果作物包括仁果类的苹果和梨; 核果类的桃、扁桃、杏、樱桃和李, 浆果类的猕猴桃和草莓; 柑橘类的沙田柚; 热带亚热带水果的芒果。蔬菜作物包括: 瓜类蔬菜的甜瓜和西瓜; 茄果类蔬菜的辣椒; 根菜类蔬菜萝卜; 白菜类蔬菜的大白菜、卷心菜或甘蓝。经济作物包括: 纤维作物的棉花; 油料作物的油菜籽。

表 1 我国壁蜂传粉的主要物种种类和作物类型
Table 1 Main species of mason bee pollination and their crop species in China

作物物种种类 Crop species	作物分类地位 Crop category	壁蜂物种种类 <i>Osmia</i> species	参考文献 References
水果作物 Fruit crops			
仁果类 Kernel fruits			
苹果 Apples <i>Malus pumila</i>	蔷薇科 Rosaceae 苹果属 <i>Malus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i> , 紫壁蜂等 <i>O. jacoti</i>	庄爱玲, 1997; 龚声信等, 2008; 何伟志和周伟儒, 2009; 王贵平等, 2013; 肖云丽等, 2019; 刘丽等, 2019b; 吴艳飞, 2020
梨 Pears <i>Pyrus</i> spp.	蔷薇科 Rosaceae 梨属 <i>Pyrus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	李振淑和彭君玲, 1997; 魏树伟等, 2012; 刘金利, 2014; 张炳龙等, 2016; 孙芳娟等, 2018; 崔丽贤和刘金利, 2019; 刘丽等, 2019a
核果类 Stone fruit			
桃 Peach <i>Prunus persica</i>	蔷薇科 Rosaceae 桃属 <i>Amygdalus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	费显伟等, 1997; 王家民等, 1997; 贾久正等, 1999; 魏枢阁, 2001; 马志峰等, 2012; 李雪峰, 2014; 宋晓辉, 2017; 禹化强等, 2019
扁桃 Almonds <i>Amygdalus communis</i>	蔷薇科 Rosaceae 桃属 <i>Amygdalus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	宋晓辉, 2017; 陆婷等, 2013

续表 1 (Table 1 continued)

作物物种种类 Crop species	作物分类地位 Crop category	壁蜂物种种类 <i>Osmia</i> species	参考文献 References
杏 Apricot <i>Armeniaca vulgaris</i>	蔷薇科 Rosaceae 杏属 <i>Armeniaca</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	杨连方, 1994; 张广泰等, 1995; 王凤鹤和姜宝泉, 1996; 卢磊等, 2022
樱桃 Cherry <i>Cerasus pseudoce</i>	蔷薇科 Rosaceae 樱属 <i>Cerasus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	陈武等, 2010; 闵显宁, 2014; 刘丽等, 2019c; 陈妮等, 2021; 王承香等, 2021
李/李子干 Plum/ prune <i>Prunus salicina</i>	蔷薇科 Rosaceae 李属 <i>Prunus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	邵军辉等, 2002
浆果类 Berry fruit			
猕猴桃 Kiwifruit <i>Actinidia chinensis</i>	猕猴桃科 Actinidiaceae 猕猴桃属 <i>Actinidia</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	李治非等, 2018
草莓 Strawberry <i>Fragaria ananassa</i>	蔷薇科 Rosaceae 草莓属 <i>Fragaria</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	庄爱玲, 1997; 贾久正等, 1999; 魏枢阁, 2001; 王岭等, 2018
柑橘类 Citrus fruits			
沙田柚 Pomelo Citrus <i>maxima</i> 'Shatian Yu'	芸香科 Rutaceae 柑橘属 <i>Citrus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i> , 紫壁蜂等 <i>O. jacoti</i>	区善汉等, 2002
热带、亚热带果树 Tropical and subtropical fruit trees			
芒果 Mango <i>Mangifera indica</i>	漆树科 Anacardiaceae 杧果属 <i>Mangifera</i>	角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	杨秀武和张承旺, 2002
蔬菜作物 Vegetable crops			
瓜类蔬菜 Gourd vegetables			
西瓜 Watermelons <i>Citrullus lanatus</i>	葫芦科 Cucurbitaceae 西瓜属 <i>Citrullus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	程栋林, 2001; 张先亮等, 2014
茄果类蔬菜 Solanaceous vegetables			
辣椒 Chillies and peppers <i>Capsicum annuum</i>	茄科 Solanaceae 辣椒属 <i>Capsicum</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	郑宇宇等, 2018
根菜类蔬菜 Root vegetable			
萝卜 Radish <i>Raphanus sativus</i>	十字花科 Cruciferae 萝卜属 <i>Raphanus</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	於校青等, 2019; 葛长军等, 2019; 刘哲等, 2022
白菜类蔬菜 Cabbage vegetable			
大白菜 Cabbage <i>Brassica pekinensis</i>	十字花科 Cruciferae 芸苔属 <i>Brassica</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	吴飞燕等, 1996; 邵祝善等, 2005; 蒋兵涛, 2019
卷心菜/甘蓝 Cabbage patch <i>Brassica oleracea</i>	十字花科 Cruciferae 芸苔属 <i>Brassica</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	马志峰等, 2013; 赵乘风等, 2017
纤维作物 Fibre crops			
棉花 Cotton <i>Gossypium</i> spp.	锦葵科 Malvaceae 棉属 <i>Gossypium</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	吴翠翠等, 2018, 2020a, 2020b; 侯保国等, 2020
油料作物 Oil crops, 主要作物有食用油料作物和工业用油作物			
油菜籽 Rapeseed <i>Brassica napus</i>	十字花科 Cruciferae 芸苔属 <i>Brassica</i>	凹唇壁蜂 <i>O. excavata</i> , 角额壁蜂 <i>O. cornifrons</i>	顾元国等, 2020; 马志峰等, 2012; 咸拴狮等, 2017; 丁维汉和胡琰茹, 2017; 刘丽等, 2018

2.2 壁蜂传粉对作物生产的生态效应

本文基于作物生物学特征包括坐果、产量、品质、生理落果和繁育种子，通过文献汇总分析，发现壁蜂传粉对作物生产的生态效益包括：提高坐果率、增加产量、改善品质、减少生理落果和提高种子质量（表 2）。

为了定量评估壁蜂传粉对作物生产的生态效益，本文总结了作物 5 个生物学特征的评估指标。1. 坐果，包括：花序坐果率（%）和花朵坐果率（%）。2. 产量，包括：单个果实重

量（g）、单株作物产量（kg）和单位面积产量（kg/hm²）。3. 品质，包括：个体外形特征方面的单个果实纵径（mm）、横径（mm）、果形指数（纵径与横径比值）和畸果率（%）；个体品质特征方面的总糖（%）、总酸（%）、糖酸比、维生素 C 含量（mg/100 g）、硬度（kg/cm²）及可溶性固形物含量（%）。4. 生理落果，包括：落果率（%）。5. 繁育种子，包括：单果种子数（粒）、含籽心室数（个）、单果种子重量（g）、种子千粒重（g）和制种产量（g/hm²（表 2）。

表 2 作物特性与壁蜂传粉对作物生产的生态效益
Table 2 Crop characters and ecological benefits of mason bee pollination for crop production

作物特性 Crop characters	生态效益 Ecological benefits	评估指标 Evaluation indicator	研究案例 Case study	参考文献 References
坐果	提高坐果率	花序坐果率（%）	凹唇壁蜂传粉提高苹果的花序坐果率和花	何伟志和周伟儒, 2009; 刘丽等, 2019b 刘丽等, 2019a
		花朵坐果率（%）	朵坐果率 凹唇壁蜂传粉提高梨的花序坐果率和花朵坐果率	
产量	提高产量	单个果实重量（g）、单株作物产量（kg）、单位面积产量（kg/hm ² ）	角额壁蜂传粉提高大樱桃的花朵坐果率	陈妮等, 2021
			角额壁蜂传粉提高苹果的单果重	肖云丽等, 2019; 王贵平等, 2013
			凹唇壁蜂传粉提高苹果的单果重	孙建设等, 1999
			角额壁蜂传粉提高苹果和大樱桃的单位面积产	肖云丽等, 2019
品质	改善品质	个体外形特征： 单个果实纵径（mm）、横径（mm）、果形指数（纵径与横径比值）、畸果率（%）； 个体品质指标： 总糖（%）、总酸（%）、糖酸比、维生素 C 含量（mg/100 g）、度（kg/cm ² ）、可溶性固形物含量（%）	壁蜂传粉增加树上干杏的单果重和果形指数； 壁蜂传粉能够提高果品品质，壁蜂传粉处理园的果实品质指标（果形指数、着色指数、光洁度指数、去皮硬度、可溶性固形物）均大于对照园 壁蜂传粉可提高苹果和大樱桃的维生素 C 含量、可溶性固形物、总糖、总酸含量及风味（固酸比）值；增加苹果和大樱桃产量	卢磊等, 2022 王贵平等, 2013 肖云丽等, 2019
			壁蜂传粉的苹果生理落果率低于对照的自	周伟儒, 2002
生理落果	减少生理落果	落果率（%）	然授粉	
繁育种子	提高种子质量	单果种子数（粒）， 含籽心室数（个）， 单果种子重量（g）， 种子千粒重（g）， 制种产量（g/hm ² ）	壁蜂传粉可提高油菜制种产量	咸拴狮等, 2015
			壁蜂对网棚甘蓝制种环境有较好的适应性，在单株平均结荚率，单荚平均结籽数及种子产量方面均高于蜜蜂	史小强等, 2015 马志峰等, 2013
			凹唇壁蜂传粉可提高青花菜种子产量； 壁蜂传粉温室辣椒的坐果率、单株结果数、种子千粒重及制种产量均高于人工授粉； 凹唇壁蜂传粉对大白菜的单株结荚数、重	姜立纲和简元才, 1996 郑宇宇等, 2018 吴飞燕等, 1996
			量及单荚粒数均高于蜜蜂授粉	

3 讨论

我国在引进应用角额壁蜂的过程中, 其他多种本地壁蜂物种如凹唇壁蜂、紫壁蜂、叉壁蜂、壮壁蜂也被发掘、繁育与应用(吴燕如, 1990, 2004; 周伟儒, 2002), 形成了我国特色的壁蜂应用模式, 并在为作物授粉增产中发挥了重要作用。

本文通过文献调研分析了壁蜂在中国农作物生产上的应用进展, 包括主要壁蜂物种、壁蜂传粉的作物类型以及提高作物坐果率和产量、改善品质、减少生理落果和提高繁育种子质量等方面的生态效应。至今为止中国范围内记载了 36 种壁蜂属物种(吴燕茹, 2006), 然而目前我国壁蜂传粉应用较多物种主要是 3 个物种, 包括凹唇壁蜂、角额壁蜂和紫壁蜂, 这表明大量的壁蜂物种没有充分得到利用。我们发现在为引进的角额壁蜂提供人工巢管等栖居条件, 同时也为本地生存的角额壁蜂以及其他壁蜂物种提供了筑巢繁育条件, 从而促进了本地壁蜂物种数量的扩增。这个过程启发我们: 通过创造和改善本地的生境栖息环境有利于保护和利用有益生物的物种资源。由此, 为了缓解和避免授粉物种减少带来的不利影响(Dicks *et al.*, 2021), 未来我们需要加强发掘、保护和利用本地壁蜂物种的传粉功能, 同时加强传粉昆虫的食物资源开花植物等种植、巢居等生境环境的保护。

目前我国应用壁蜂传粉的主要作物包括果树、蔬菜、纤维作物和油料作物等 20 多种农作物, 涵盖了我国大部分重要水果、蔬菜和经济作物。根据分类学地位和作物花器官的特征, 壁蜂传粉将可应用推广到已应用作物的近缘种, 从而进一步拓展壁蜂的应用范围和提升其传粉增产功能。过去 30 多年, 尽管蜜蜂类传粉昆虫包括西方蜜蜂、中华蜜蜂、熊蜂、切叶蜂和无刺蜂等系列蜂种均得到了一定的研究与应用(王凤鹤等, 2012), 但是壁蜂特别是其幼虫以花粉为主要食物, 壁蜂成虫采集花粉过程中, 对作物的传粉有一定的优势。与社会性蜂不同, 独栖性壁蜂营独居生活, 在自然中偏好在植物空茎、树洞、

石缝及昆虫废弃的巢穴内营巢, 没有社会性分工; 而且雌性独栖蜂与雄虫成功交配后, 独自为后代筑巢、觅食和产卵, 全程无需雄虫或其它个体协助(Michener, 2007), 因此应用壁蜂传粉在管理上更为方便与经济上更实惠。

本文基于调研文献的具体评估指标, 进一步分析了壁蜂传粉对作物生产的生态效益包括: 提高坐果率、提高产量、改善品质、减少生理落果和提高种子质量。本文内容为全国范围内加快推广应用壁蜂传粉和满足农作物生产对昆虫传粉的需求提供科学依据。然而, 壁蜂在访花和采集花粉, 同时给作物传播花粉过程中, 促进作物生产产生生态效益的生理和分子机制是什么, 还需要进一步系统的研究。

参考文献 (References)

- Chen N, Wang LP, Yu YQ, 2021. Comparative study on pollination effect of honeybee and *Osmia* on cherry. *China Fruit & Vegetable*, 41(3): 64–67. [陈妮, 王利平, 于月芹, 2021. 蜜蜂与壁蜂对大樱桃授粉效果对比研究. 中国果菜, 41(3): 64–67.]
- Chen W, Fu L, Wang M, 2010. Pollination techniques of mason bee for sweet cherry (*Cerasus avium*). *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2010(3): 32. [陈武, 付林, 王敏, 2010. 甜樱桃壁蜂授粉技术. 四川农业科技, 2010(3): 32.]
- Cheng DL, 2001. Introduction of a new pollination technique for watermelon and melon. *Nongcun Baishitong*, 2001(9): 29–30. [程栋林, 2001. 介绍一种新型西瓜、甜瓜授粉技术——壁蜂授粉. 农村百事通, 2001(9): 29–30.]
- Cui LX, Liu JL, 2019. Assisted pollination technology of pear trees during flowering period. *Yantai Fruits*, 2019(4): 52. [崔丽贤, 刘金利, 2019. 梨树花期辅助授粉技术. 烟台果树, 2019(4): 52.]
- Dicks LV, Breeze TD, Ngo HT, Senapathi D, An J, Aizen MA, Basu P, Buchori D, Galetto L, Garibaldi LA, Gemmill-Herren B, Howlett BG, Imperatriz-Fonseca VL, Johnson SD, Kovács-Hostyánszki A, Kwon YJ, Lattorff HMG, Lungharwo T, Seymour CL, Vanbergen AJ, Potts SG, 2021. A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nature Ecology & Evolution*, 5(10): 1453–1461.
- Ding WH, Hu YR, 2016. Techniques for breeding rapeseed parents by (*Osmia cornifrons*). *Journal of Changjiang Vegetables*, 2016(3): 42–43. [丁维汉, 胡琰茹, 2016. 网室中利用角额壁蜂授粉繁育油菜亲本技术. 长江蔬菜, 2016(3): 42–43.]
- Fei XW, Liu EP, Wang LZ, Wang N, 1997. Study on using mason

- bees for peach pollination in protective ground in winter in northern China. *Journal of Fruit Science*, 14(3): 153–155. [费显伟, 刘恩璞, 王立忠, 王宁, 1997. 北方冬季保护地桃应用壁蜂授粉研究. *果树科学*, 14(3): 153–155.]
- Ge CJ, Yan L, Xu LR, Yu CG, Luo JL, Jiang YY, 2019. Seed production technology of Huangzhou radish by purification and rejuvenation of mason bee pollination. *Northern Horticulture*, 2019(9): 198–199. [葛长军, 闫良, 徐丽荣, 喻春桂, 罗九玲, 蒋艳艳, 2019. 壁蜂授粉提纯复壮黄州萝卜制种技术. *北方园艺*, 2019(9): 198–199.]
- Gong SX, Zhao GH, Zhao XQ, Li XY, Shi AX, Yang YJ, Yu Y, Chen AD, 2008. Application of *Osmia excavata* (Alfken) for apple production in Yunnan altiplate of China. *Journal of Environmental Entomology*, 30(4): 344–349. [龚声信, 赵高慧, 赵雪晴, 李向永, 石安宪, 杨毅娟, 于毅, 湛爱东, 2008. 凹唇壁蜂在云南高原苹果产区的应用. *环境昆虫学报*, 30(4): 344–349.]
- Gu YG, Jia DH, Hou XF, Li Q, Shi BX, Li Y, Lin P, Lei ZH, Huang QX, Maimaiti·YM, Maio HC, Zhao WF, Dong AY, Ai HF, Zhang Y, 2020. Technical regulation for assisted pollination of spring rapeseed by mason bee. *Rural Science and Technology*, 2020(6): 3–5. [顾元国, 贾东海, 侯献飞, 李强, 石必显, 李瑜, 林萍, 雷中华, 黄启秀, 买买提·依明, 苗昊翠, 赵卫芳, 董爱云, 艾海峰, 张艳红, 2020. 春油菜网室壁蜂辅助授粉技术规程. *农村科技*, 2020(6): 3–5.]
- He WZ, Zhou WR, 2009. Study on the effect of mason bee (*Osmia excavata*), honeybee (*Apis mellifera*) and hand-pollinate on apple pollination. *Apiculture of China*, 60(11): 9–11, 15. [何伟志, 周伟儒, 2009. 凹唇壁蜂、意大利蜜蜂与人工授粉对苹果授粉效果研究. *中国蜂业*, 60(11): 9–11, 15.]
- Hou BG, Li PB, Fan ZX, Yang LL, Xia Z, Cao CR, Wu CC, Ding X, Lan G, 2020. Problems and countermeasures of mason bee pollination for cotton seed production. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(8): 25, 30. [侯保国, 李朋波, 潘转霞, 杨六六, 夏芝, 曹彩荣, 吴翠翠, 丁霄, 兰刚, 2020. 棉花壁蜂传粉制种存在的问题及应对措施. *现代农业科技*, 2020(8): 25, 30.]
- Jia JZ, Zhan ZL, Ji WH, 1999. Greenhouse peach and strawberry introduced mason bee pollination. *Hebei Fruits*, 1999(2): 53. [贾久正, 翟占来, 纪为红, 1999. 温室桃、草莓引进壁蜂授粉好. *河北果树*, 1999(2): 53.]
- Jiang LG, Jian YC, 1996. Application of pollination by mason bee (*Osmia excavata*) in broccoli seed production. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 11(4): 128–130. [姜立纲, 简元才, 1996. 凹唇壁蜂在青花菜制种授粉中的应用. *华北农学报*, 11(4): 128–130.]
- Jiang BT, 2019. Seed production technology of Chinese cabbage in Xizang. *China Fruit and Vegetable*, 39(10): 90–93. [蒋兵涛, 2019. 西藏大白菜制种技术. *中国果菜*, 39(10): 90–93.]
- Li XF, 2014. Pollination techniques of Anqiu nectarine of China. *Practical Technology and Information of Fruit Tree*, 2014(7): 11. [李雪峰, 2014. 安丘蜜桃壁蜂授粉技术. *果树实用技术与信息*, 2014(7): 11.]
- Li ZS, Peng JL, 1997. Pollination of mason bee released in pear orchards has significant efficiency of increasing production and saving expenditure. *Guangxi Horticulture*, 8(3): 27–28. [李振淑, 彭君玲, 1997. 梨园释放壁蜂授粉增产节支效益显著. *广西柑桔*, 8(3): 27–28.]
- Li ZF, Cui YL, Deng FG, Fang L, 2018. Application techniques of mason bee pollination in kiwifruit orchard in Deyang area of China. *South China Agriculture*, 12(2): 27–30. [李治菲, 崔永莉, 邓方贵, 方莉, 2018. 德阳地区猕猴桃园壁蜂授粉应用技术探究. *南方农业*, 12(2): 27–30.]
- Liu JL, Cui LX, Le WQ, 2014. Experiment on the pollination effect of mason bee on different pear varieties. *Hebei Fruits*, 2014(1): 44–45. [刘金利, 崔丽贤, 乐文全, 2014. 凹唇壁蜂对不同梨树品种授粉效果试验. *河北果树*, 2014(1): 44–45.]
- Liu JL, 2014. Experiment on pollination of mason bee from different pear trees. *Shanxi Fruits*, 2014(3): 56–57. [刘金利, 2014. 不同梨树壁蜂授粉试验. *山西果树*, 2014(3): 56–57.]
- Liu L, Li LL, Ouyang F, Li C, Yu Y, Qu CH, Qu ZL, Men XY, Ye BH, 2019a. Fruit-setting and yield increase for pear pollination by *Osmia excavata* Alfken and evaluation of economic value in Shandong province of China. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(8): 233–236. [刘丽, 李丽莉, 欧阳芳, 李超, 于毅, 曲诚怀, 曲在亮, 门兴元, 叶保华, 2019a. 山东省凹唇壁蜂为梨授粉坐果增产及经济价值评估. *农业科技通讯*, 2019(8): 233–236.]
- Liu L, Li LL, Ouyang F, Li C, Yu Y, Qu CH, Qu ZL, Ye BH, Men XY, 2019b. Fruit-setting and yield increase for apple pollination by *Osmia excavata* Alfken and evaluation of economic value in Shandong province of China. *Apiculture of China*, 70(8): 65–68. [刘丽, 李丽莉, 欧阳芳, 李超, 于毅, 曲诚怀, 曲在亮, 叶保华, 门兴元, 2019b. 山东省凹唇壁蜂为苹果授粉坐果增产及经济价值评估. *中国蜂业*, 70(8): 65–68.]
- Liu L, Li LL, Ouyang F, Li C, Yu Y, Qu CH, Qu ZL, Ye BH, Men XY, 2019c. Fruit-setting and yield increase for cherry pollination by *Osmia excavata* Alfken and evaluation of economic value in Shandong province of China. *Shandong Agricultural Sciences*, 51(5): 125–128. [刘丽, 李丽莉, 欧阳芳, 李超, 于毅, 曲诚怀, 曲在亮, 叶保华, 门兴元, 2019c. 山东省凹唇壁蜂为樱桃授粉坐果增产及经济价值评估. *山东农业科学*, 51(5): 125–128.]

- Liu L, Ouyang F, Li LL, Qu CH, Li C, Yu Y, Zheng L, Ye BH, Men XY, 2018. Economic value of the pollination services provided by *Osmia excavata* Alfken to rape seed crops. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(6): 1016–1022. [刘丽, 欧阳芳, 李丽莉, 曲诚怀, 李超, 于毅, 郑礼, 叶保华, 门兴元, 2018. 凹唇壁蜂为油菜授粉的行为特征及经济价值评估. 应用昆虫学报, 55(6): 1016–1022.]
- Liu Z, Shen F, Zheng JQ, Xu L, Zu YX, Wu YC, Wang WW, Zhang LN, Zhang L, Feng RC, Mei Y, 2022. Influencing factors on quality of radish seed production assisted by mason bee pollination. *Yangtze River Vegetables*, 2022(14): 66–68. [刘哲, 沈峰, 郑佳秋, 徐良, 祖艳侠, 吴永成, 王薇薇, 张丽娜, 张力, 冯汝超, 梅焱, 2022. 影响壁蜂辅助萝卜制种质量的因素. 长江蔬菜, 2022(14): 66–68.]
- Lu L, Tang J, Chen SY, Xiawukaiti Maimaiti, Abuduresiti Abuleti, 2022. Effects of pollination technology on fruit setting rate of shushanggan apricot by *osmia* bees. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2022(2): 58–62. [卢磊, 唐金, 陈淑英, 夏吾开提·买买提, 阿布都热西提·阿不来提, 2022. 树上干杏壁蜂授粉技术对坐果率的影响. 黑龙江农业科学, 2022(2): 58–62.]
- Lu T, Luo SP, Li J, Tang KW, Yusufu·Abulitifu, 2013. Studies on flowering and pollination biology of almond. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 50(3): 447–452. [陆婷, 罗淑萍, 李疆, 唐开文, 玉苏甫·阿不力提, 2013. 扁桃开花及传粉生物学特性研究. 新疆农业科学, 50(3): 447–452.]
- Ma ZF, Guo MZ, Wang RH, Wang ZM, 2012. Study on pollination by *Osmia cornifrons* on nectarine in solar greenhouse. *Northern Horticulture*, 2012(5): 48–50. [马志峰, 郭民主, 王荣花, 王智民, 2012. 日光温室油桃壁蜂授粉技术研究. 北方园艺, 2012(5): 48–50.]
- Ma ZF, Wang RH, Xu AX, Wang ZM, 2012. Application of mason bee pollination in seed production of rapeseed in small net houses. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 58(3): 73–74, 76. [马志峰, 王荣花, 徐爱遐, 王智民, 2012. 壁蜂在小网棚油菜制种授粉中的应用. 陕西农业科学, 58(3): 73–74, 76.]
- Ma ZF, Zhang EH, Wang ZM, 2013. Pollination effects of *Osmia cornifrons* on breeding cabbage in net houses. *Northern Horticulture*, 2013(13): 29–31. [马志峰, 张恩惠, 王智民, 2013. 角额壁蜂对网室制种甘蓝授粉效果的影响. 北方园艺, 2013(13): 29–31.]
- Mashilingi SK, Zhang H, Garibaldi LA, An JD, 2022. Honeybees are far too insufficient to supply optimum pollination services in agricultural systems worldwide. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108003>.
- Men XY, Li LL, Lu ZB, Ouyang F, Liu L, Xu H, Yu Y, 2018. Biological characteristics and pollination service of mason bee. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(6): 973–983. [门兴元, 李丽莉, 卢增斌, 欧阳芳, 刘丽, 徐衡, 于毅, 2018. 壁蜂生物学特性与传粉服务功能. 应用昆虫学报, 55(6): 973–983.]
- Michener CD, 2007. *The Bees of the World* (Second Edition). Baltimore: Johns Hopkins University Press. 6–15.
- Min XN, 2014. Pollination techniques of mason bee for cherry. *Fruits Growers' Friend*, 2014(3): 25. [闵显宁, 2014. 大樱桃壁蜂授粉技术. 果农之友, 2014(3): 25.]
- Orr MC, Hughes AC, Chesters D, Pickering J, Zhu CD, Ascher JS, 2021. Global patterns and drivers of bee distribution. *Current Biology*, 31: 451–458.
- Ouyang F, Wang LN, Yan Z, Men XY, Ge F, 2019. Evaluation of insect pollination and service value in China's agricultural ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 39(1): 131–145. [欧阳芳, 王丽娜, 闫卓, 门兴元, 戈峰, 2019. 中国农业生态系统昆虫授粉功能与服务价值评估. 生态学报, 39(1): 131–145.]
- Ou SH, Ye HE, Yang DB, Ou SY, 2002. Experiment on increasing fruit setting rate of Shatin Pomelo (*Citrus maxima*) by mason bee pollination. *Guangxi Horticulture*, 13(3): 3–4. [区善汉, 叶鸿恩, 杨德彪, 欧少岳, 2002. 壁蜂授粉提高沙田柚坐果率试验. 广西园艺, 13(3): 3–4.]
- Shao JH, 2002. Experiment on the pollination of mason bee during plum flowering period in solar greenhouse. *Shanxi Fruits*, 2002(4): 36–37. [邵军辉, 2002. 日光温室李花期壁蜂授粉试验. 山西果树, 2002(4): 36–37.]
- Shao ZS, Liu ZQ, Liu BJ, 2005. Pollination techniques of mason bee in parent reproduction of Chinese cabbage. *Seed World*, 2005(12): 45. [邵祝善, 刘赞群, 刘宝敬, 2005. 壁蜂在大白菜亲本繁殖中的授粉技术. 种子世界, 2005(12): 45.]
- Shi XQ, Song XN, Liu YB, Yang JL, 2015. Pollination effect of honey bee and mason bee on cabbage seed production in net houses. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015(8): 171–172. [史小强, 宋小南, 刘艳波, 杨金兰, 2015. 网棚甘蓝制种中蜜蜂和壁蜂授粉效应研究. 黑龙江农业科学, 2015(8): 171–172.]
- Song XH, 2017. Effects of three pollination methods on nectarine yield in Xinjiang greenhouse of China. *Chinese Horticultural Abstracts*, 33(8): 37, 57. [宋晓辉, 2017. 3种授粉方式对新疆大棚油桃产量的影响. 中国园艺文摘, 33(8): 37, 57.]
- Sun FJ, Zha YL, Su BH, Li YF, 2018. Experiment on pollination effect of mason bee in apple orchard. *Northwest Horticulture*, 2018(2): 57–58. [孙芳娟, 查养良, 苏勃海, 李亚峰, 2018. 苹果园壁蜂授粉效果试验. 西北园艺(综合), 2018(2): 57–58.]
- Sun JS, Wang HY, Lei HD, Zhang Y, Jin HJ, 1999. Effect of mason bee pollination on fruit setting and quality of Red Fuji apple. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 14(4): 26–29. [孙建设, 王海英, 雷宏典, 张英, 靳海军, 1999. 壁蜂传粉对

- 红富士苹果坐果及品质的影响. 河北林果研究, 14(4): 26–29.]
- Wang BY, 1989. A new technique for improving fruit yield by releasing mason bee. *Chinese Journal of Biological Control*, 5(3): 145. [王宝义, 1989. 释放壁蜂提高果树座果率新技术. 生物防治通报, 5(3): 145.]
- Wang CX, Hu HY, Zhang RH, Liu Y, Liu ZL, 2021. Study on application of honeybee activity enhancer on sweet cherry. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 50(3): 125–129. [王承香, 胡海燕, 张瑞华, 刘英, 刘振龙, 2021. 蜜蜂活动增强剂在甜樱桃上的应用研究. 河南农业科学, 50(3): 125–129.]
- Wang FH, Jiang BQ, 1996. The pollination technique by mason bee for apricot and its effect on increasing yield, *Journal of Bee*, 16(2): 7–8. [王凤鹤, 姜宝泉, 1996. 用壁蜂为杏树授粉的技术与增产效果. 蜜蜂杂志, 16(2): 7–8.]
- Wang FH, Xu XL, Cheng Q, Yang F, Guo ZH, 2012. Research progress of honeybee pollination in Beijing. *Apiculture of China*, 63(25): 28–30. [王凤鹤, 徐希莲, 陈强, 杨甫, 郭志弘, 2012. 北京蜜蜂授粉工作研究进展. 中国蜂业, 63(25): 28–30.]
- Wang GP, Zha YL, Ma M, Liu Chang, Wang JZ, 2013. Pollination biological characteristics and pollination effect of mason bee in different apple producing areas. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29(34): 171–176. [王贵平, 查养良, 马明, 刘畅, 王金政, 2013. 不同苹果产区壁蜂授粉生物学特性及授粉效应研究. 中国农学通报, 29(34): 171–176.]
- Wang GP, Xue XM, Lu C, Yang ZJ, Wang JZ, 2013. Pollination techniques of mason bee for apple in Bohai Bay area of China. *Northern Horticulture*, 2013(13): 62. [王贵平, 薛晓敏, 路超, 杨作军, 王金政, 2013. 渤海湾地区苹果壁蜂授粉技术. 北方园艺, 2013(13): 62.]
- Wang JM, Zhang FZ, Han FZ, Zhang FX, Li JB, 1997. Experiment on pollination of mason bee for nectarine in greenhouse. *Northern Fruits*, 1997(2): 37. [王家民, 张福珍, 韩凤珠, 张福兴, 李积彬, 1997. 释放壁蜂为温室油桃授粉试验. 北方果树, 1997(2): 37.]
- Wang L, Liu C, Tian LM, Yang S, Li X, Li DZ, Nie X, Liu YY, 2018. Effect of different pollination methods on yield of overwintering strawberry. *South China Agriculture*, 12(23): 27–28, 30. [王岭, 刘畅, 田丽美, 杨升, 李响, 李德泽, 聂鑫, 刘莹莹, 2018. 不同授粉方式对越冬生产草莓产量的影响. 南方农业, 12(23): 27–28, 30.]
- Wei SG, Wang R, 1990. Using the domesticated mason bee (*Osmia cornifrons*) to increase fruit set and yield of apple tree. *China Fruits*, 1990(1): 31–32. [魏枢阁, 王韧, 1990. 利用驯化的角额壁蜂提高苹果树座果率及产量. 中国果树, 1990(1): 31–32.]
- Wei SG, 2001. Mason bee pollination for greenhouse peaches and strawberries. *Beijing Agriculture*, 2001(1): 22. [魏枢阁, 2001. 温室桃和草莓人工利用壁蜂授粉. 北京农业, 2001(1): 22.]
- Wei SW, Wang Y, Wang HW, Zhang Y, Wang SM, 2012. Study on effect of mason bee pollination and artificial pollination on the fruit setting rate of Dangshansi pear. *Deciduous Fruits*, 2012(3): 5–6. [魏树伟, 王越, 王宏伟, 张勇, 王少敏, 2012. 壁蜂授粉加人工授粉对砀山酥梨坐果率的影响研究初报. 落叶果树, 2012(3): 5–6.]
- Wu CC, Li PB, Xia Z, Hou BG, Yang LL, Pan ZX, Cao CR, Ding X, Lan G, 2020a. Factors influencing pollination of cotton sterile lines by mason bee in net house. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 24(6): 69–70. [吴翠翠, 李朋波, 夏芝, 侯保国, 杨六六, 潘转霞, 曹彩荣, 丁霄, 兰刚, 2020a. 影响壁蜂网室内棉花不育系授粉的因素. 河北农业科学, 24(6): 69–70.]
- Wu CC, Li PB, Xia Z, Hou BG, Yang LL, Pan ZX, Cao CR, Ding X, 2020b. Comparison of bumblebee, honeybee and osmia in seed production of cotton sterile lines. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 48(11): 1805–1807. [吴翠翠, 李朋波, 夏芝, 侯保国, 杨六六, 潘转霞, 曹彩荣, 丁霄, 2020b. 网室内熊蜂、蜜蜂和壁蜂在棉花不育系制种中的比较. 山西农业科学, 48(11): 1805–1807.]
- Wu CC, Xia Z, Hou BG, Cao CR, 2018. Effect of honeybee pollination and wall bee pollination on cotton sterile lines in net house. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 46(12): 2014–2017, 2081. [吴翠翠, 夏芝, 侯保国, 曹彩荣, 2018. 网室内蜜蜂授粉和壁蜂授粉对棉花不育系的影响. 山西农业科学, 46(12): 2014–2017, 2081.]
- Wu FY, Sun RF, Si JG, Zhang SJ, Niu XK, 1996. Mason bee pollination, a new technique for Chinese cabbage. *China Vegetables*, 1996(5): 16. [吴飞燕, 孙日飞, 司家钢, 张淑江, 钮心恪, 1996. 大白菜采种新技术—壁蜂授粉. 中国蔬菜, 1996(5): 16.]
- Wu YF, 2020. A preliminary report on mason bee pollination of apple in Beipiao area. *Modern Agriculture*, 2020(8): 59. [吴艳飞, 2020. 苹果角额壁蜂授粉在北票地区田间试验初报. 现代农业, 2020(8): 59.]
- Wu YR, 1990. The identification of several mason bee species for apple pollination in northern China. *Apiculture of China*, 1990(6): 18. [吴燕如, 1990. 我国北方地区几种为苹果传粉壁蜂的鉴别. 中国养蜂, 1990(6): 18.]
- Wu YR, 2004. Ten new species of the tribe osmiini from China (Apoidea, Megachilidae, Osmiini). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 29(3): 531–537. [吴燕如, 2004. 中国壁蜂族十新种记述(蜜蜂总科, 切叶蜂科, 壁蜂族)(英文). 动物分类学报, 29(3): 531–537.]
- Wu YR, 2006. *Insecta. Vol.44. Hymenoptera megachilidae*. Beijing: Science Press. 38–75. [吴燕如, 2006. 中国动物志. 昆虫纲. 第

- 四十四卷. 膜翅目切叶蜂科. 北京: 科学出版社. 38–75.]
- Xian SS, 2017. Technical regulation on hybrid seed production of rapeseed by pollination of mason bee (*Osmia cornifrons*) in net house. DB 14/T 1385-2017. [咸拴狮, 2017. 油菜网棚杂交制种角额壁蜂授粉技术规程. 山西省地方标准. DB 14/T 1385–2017.]
- Xian SS, Du CF, Fan JC, Ma DJ, Xian LX, 2015. Biological characteristics of mason bee and its application in hybrid seed production of rapeseed. *Journal of Agriculture*, 5(4): 44–47. [咸拴狮, 杜春芳, 范建春, 马冬菊, 咸丽霞, 2015. 壁蜂生物学特性及其在油菜杂交制种中的应用研究. 农学学报, 5(4): 44–47.]
- Xiao YL, Tang WY, Liu CH, Yu K, Gong Y, Yang QM, Zhang YG, Qu CH, Wang LP, Guo D, Yu LY, 2019. Analysis of the pollinating services provided by *Osmia cornifrons* (Rodoszkowski) and *Apis mellifera ligustica* Spin in apple and cherry orchards. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1235–1242. [肖云丽, 唐文颖, 刘存辉, 于凯, 公义, 杨勤民, 张玉国, 曲诚怀, 王利平, 国栋, 于玲雅, 2019. 壁蜂及蜜蜂授粉对苹果和大樱桃授粉服务功能分析. 应用昆虫学报, 56(6): 1235–1242.]
- Yang LF, Liu XS, Zhao CM, 1994. Biological characters of *Osmia excavata* atik and influence on fruit setting of apricot. *Journal of Hebei Agrotechnical Teachers College*, 8(2): 77–80. [杨连方, 刘新生, 赵春明, 1994. 凹唇壁蜂生物学特性及对杏树座果的影响. 河北农业技术师范学院学报, 8(2): 77–80.]
- Yang XW, Zhang CW, 2002. Biological characteristics and pollination experiment of mango in flowering period. *Southeast Horticulture*, 2002(2): 12–14. 杨秀武, 张承旺, 2002. 角额壁蜂生物学特性及芒果花期授粉试验. 东南园艺, 2002(2): 12–14.]
- Yu XQ, Gan CX, Deng XH, Cui L, 2019. The application of *Osmia cornifrons* (Radoszkowski) to the pollination of radish. *Hubei Agricultural Sciences*, 58(S2): 314–315. [於校青, 甘彩霞, 邓晓辉, 崔磊, 2019. 角额壁蜂在萝卜授粉上的应用. 湖北农业科学, 58(S2): 314–315.]
- Yu HQ, Cui YY, Wang XY, Zhao L, 2019. Application of mason bee pollination technology in peach orchard in Mengy. *Practical Technology and Information of Fruit Tree*, 2019(8): 10–11. [禹化强, 崔莹莹, 王孝友, 赵雷, 2019. 蒙阴桃园壁蜂授粉技术应用. 果树实用技术与信息, 2019(8): 10–11.]
- Zhang BL, Gao LJ, Zhang HE, Li LF, Le WQ, Hao BF, Xu JT, 2016. Artificial release technology of mason bee pollination in pear orchard. *Hebei Fruits*, 2016(2): 19, 23. [张炳龙, 高丽娟, 张海娥, 李龙飞, 乐文全, 郝宝锋, 徐金涛, 2016. 梨园壁蜂人工放养技术. 河北果树, 2016(2): 19, 23.]
- Zhang GT, Wang ZD, Cheng GX, Zhang XC, Yang XC, Yang DS, 1995. Population fluctuation of *Osmia cornifrons* in field and its pollination application in apricot tree. *Yantai Fruits*, 1995(4): 6–7. [张广泰, 王振德, 陈光兴, 张秀昌, 杨东声, 1995. 角额壁蜂田间消长规律及在杏树授粉上的应用. 烟台果树, 1995(4): 6–7.]
- Zhang XL, Huo ZB, Wu CC, Wu ZQ, Cheng ZQ, Li SJ, 2014. Application analysis on mason bee pollination of watermelon cultivated in protected land. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 42(12): 1339–1343. [张先亮, 霍治邦, 吴翠翠, 吴占清, 程志强, 李素娟, 2014. 壁蜂在保护地栽培西瓜授粉中的应用分析. 山西农业科学, 42(12): 1339–1343.]
- Zhao CF, Zhao J, Li Y, 2017. Bee pollination management technique in cabbage breeding in greenhouse. *Agricultural Technology & Equipment*, 2017(7): 74–75. [赵乘风, 赵俊, 李岩, 2017. 甘蓝温室原种繁育蜜蜂授粉管理技术. 农业技术与装备, 2017(7): 74–75.]
- Zhao LY, Wei SG, Wei SL, 1990. The experiment of introducing and using mason bee pollination of Japanese fruit trees succeeded. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 1990(2): 28–29. [赵兰英, 魏枢阁, 魏守礼, 1990. 引进利用日本果树授粉壁蜂试验成功. 河北农业科学, 1990(2): 28–29.]
- Zheng YY, Luo AY, Liu FJ, Song XX, Lü YN, Zhang JH, Ding YH, Xie ZJ, Zhang HB, Chang YK, 2018. Preliminary studies on application of wall bee pollination technology in three-line seed production system of pepper. *China Vegetables*, 2018(9): 38–41. [郑宇宇, 罗爱玉, 刘芳军, 宋秀秀, 吕彦妮, 张建华, 丁耀宏, 谢宗江, 张红宾, 常有凯, 2018. 三系配套辣椒制种壁蜂授粉技术应用初探. 中国蔬菜, 2018(9): 38–41.]
- Zhou WR, Wang R, Wei SG, Wei SL, Zhao LY, 1990. Artificial use of mason bee to pollinate fruit trees. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 1990(6): 15. [周伟儒, 王韧, 魏枢阁, 魏守礼, 赵兰英, 1990. 人工利用壁蜂为果树授粉. 农业科技通讯, 1990(6): 15.]
- Zhou WR, 2002. A New Technique of Mason Bee Pollination for Fruit Tree. Beijing: Jingdun Press. 12–17. [周伟儒, 2002. 果树壁蜂授粉新技术. 北京: 金盾出版社. 12–17.]
- Zhuang AL, 1997. Investigation on pollination effect of mason bee (*Osmia cornifrons*) on apple and strawberry in greenhouse. *Yantai Fruits*, 1997(2): 38–39. [庄爱玲, 1997. 应用角额壁蜂给苹果和大棚草莓授粉效果调查. 烟台果树, 1997(2): 38–39.]