

壁蜂授粉存在的问题与展望*

石晓宇^{1,3**} 邹怡^{3***} 罗阿蓉¹ 牛泽清¹ 朱朝东^{1,2***}

(1. 中国科学院动物研究所, 动物进化与系统学院重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 生命科学学院, 北京 100049; 3. 西交利物浦大学, 苏州 215123)

摘要 壁蜂 *Osmia* spp. 的授粉服务功能在全球农作物生产中发挥着重要的作用, 但我们对其授粉效率和应用过程中的影响因素的基础研究仍然十分有限。农业景观会影响壁蜂授粉的表现。在不同的农业景观内, 当地与目标作物同时开花的野生植物、当地传粉昆虫群落、捕食者、拟寄生者和病原体可以增强/削弱壁蜂的授粉表现及壁蜂蜂茧的回收。我们需要评估从壁蜂引入到对当地农业生态系统的潜在影响。引入的壁蜂有可能与本土野生蜂物种竞争筑巢栖息地、筑巢材料和食物, 并可能通过帮助入侵植物授粉来促进其扩散。本文综述了利用壁蜂进行授粉存在的潜在问题, 并基于四个方面讨论壁蜂应用成本与效益: 1) 将农业景观纳入壁蜂授粉应用的评估; 2) 评估壁蜂对当地生态系统的潜在影响; 3) 评估壁蜂的授粉价值; 4) 对比壁蜂与蜜蜂的授粉效果, 旨在指导农民在不同的农业景观内使用壁蜂进行授粉。

关键词 壁蜂; 农作物授粉; 罩笼实验; 农业景观; 蜜蜂授粉

Issues and prospects of mason bee pollination application

SHI Xiao-Yu^{1,3**} ZOU Yi^{3***} LUO A-Rong¹ NIU Ze-Qing¹ ZHU Chao-Dong^{1,2***}

(1. Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Xi'an Jiaotong Liverpool University, Suzhou 215123, China)

Abstract Mason bees (*Osmia* spp.) have been used to pollinate some crops worldwide but information on the factors affecting their efficiency remains limited. This paper reviews some commonly encountered problems when using mason bees as pollinators and provide suggestions for using mason bees as pollinators in different agricultural landscapes. A variety of factors can affect the performance of mason bees as pollinators and the recovery of bee cocoons, including plants flowering at the same time as the target crop, local pollinator communities, predators, parasitoids and pathogens. The potential impact of introducing mason bees into local agroecosystems should be evaluated before they are introduced. Introduced mason bees may compete with native wild bee species for habitats, nesting materials and food resources, and may also pollinate invasive plants. The following points should be considered before using mason bees as pollinators: 1. Is the agricultural landscape suitable for mason bees? 2. What are the potential adverse impacts of mason bees on local ecosystems? 3. What is the likely contribution of mason bees to crop yield? 4. How would pollination by mason bees compare to that by honey bees? Overall, we encourage careful assessment of these points to ensure that mason bees are only deployed as pollinators in the appropriate ecological conditions.

Key words mason bee; crop pollination; cage experiment; agricultural landscape; honeybee pollination

野生传粉昆虫是生物多样性的的重要组成部分, 也是农业生态系统中授粉服务的重要媒介 (Potts *et al.*, 2010)。然而, 农业土地利用方式

的改变、半自然生境的丧失以及气候变化等因素容易导致野生传粉昆虫数量和种类减少, 并间接导致依赖昆虫授粉的农作物授粉不足, 对作物产

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金 (31700363); 国家杰出青年基金项目 (31625024); 中国科学院动物进化与系统学重点实验室经费 (No. 2008DP173354)。

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

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: yi.zou@xjtlu.edu.cn; zhued@ioz.ac.cn

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

量和品质产生重要影响 (Aizen *et al.*, 2009)。为解决授粉不足的问题, 目前采用人工引放传粉蜂, 给特定农作物授粉工作以确保产量, 包括家养蜜蜂 (Stein *et al.*, 2017)、熊蜂 (Eeraerts *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022b) 和壁蜂 (Boyle and Pitts-Singer, 2019)。

壁蜂 *Osmia* spp. 属于蜜蜂总科 Apoidea 切叶蜂科 Megachilidae, 因其利用泥土等材料在墙缝或天然管状结构中 (如空心树干或芦苇管) 筑巢而得名, 具有集群性和独居性。目前壁蜂物种超过 300 种, 很多在传粉服务功能上起着重要作用。日本最早开始对野生壁蜂进行研究, 并成功驯化出了可人工管理的角额壁蜂 *Osmia cornifrons* Radoszkowski, 1887, 并发展成为果树的商业性授粉昆虫, 以解决当地果树和农作物的授粉不足 (Jauker *et al.*, 2012)。壁蜂现已被许多国家引入用于授粉目标作物, 比如 *Osmia lignaria* 和 *Osmia rufa* (Jauker *et al.*, 2012; Sedivy and Dorn, 2014; Ahrenfeldt *et al.*, 2019)。中国应用较多的壁蜂主要有叉壁蜂 *Osmia pedicornis* Cockerell, 1919、壮壁蜂 (*Osmia taurus* Smith, 1873、凹唇壁蜂 *Osmia excavata* Alfken, 1903、紫壁蜂 *Osmia jacoti* Cockerell, 1929 和角额壁蜂等 (徐环李等, 1994; 吕龙石等, 2002; 刘丽等, 2019), 可以提高苹果、梨 (吕龙石等, 2002)、大樱桃 (陈妮等, 2021)、油桃 (马志峰等, 2012) 和猕猴桃 (李治菲等, 2018) 等水果的产量和品质。农民通常购买壁蜂茧, 并将芦苇或竹子固定在木棍上设置巢管 (Bosch and Kemp, 2002)。壁蜂完成交配后, 雌性觅食花粉和花蜜作为幼虫的食物, 与此同时完成作物授粉。在壁蜂幼虫化蛹后, 农民将收集蜂蛹 (茧), 储存并在次年放入巢管使用, 从而完成一个循环。当然, 壁蜂管理对于有效的授粉非常重要, 包括巢管的位置和方向, 蜂茧回收和孵化以及筑巢材料的准备 (合适的巢管和土壤) (Bosch and Kemp, 2002)。

壁蜂已经被作为商业化的传粉昆虫在世界各地被应用 (Bosch and Kemp, 2002; Ahrenfeldt *et al.*, 2019), 但是对于壁蜂应用的成本收益以及对应用地区的生态影响尚不明确。为评估壁蜂授粉在农业生产中的应用, 本文从以下四个方面

讨论和评估壁蜂应用成本效益: 1) 将农业景观纳入壁蜂授粉应用的必要性; 2) 壁蜂对当地农业生态系统 (野生传粉昆虫和植物群落) 的潜在影响; 3) 壁蜂的授粉价值; 4) 壁蜂与蜜蜂授粉效果对比。

1 将农业景观纳入壁蜂授粉应用的必要性

农业景观影响壁蜂授粉表现。农户使用壁蜂授粉的收益可以通过该公式算出: 农户收益=壁蜂应用增加的农作物产量效益-壁蜂蜂茧成本-壁蜂巢管土地占用成本-壁蜂巢管成本-壁蜂蜂茧回收以及室内储藏成本-壁蜂巢管每年维护成本 (清洁巢管和补充新巢管)。农业景观可以通过影响雌性壁蜂的存活率和访花行为以及蜂茧回收数量来影响壁蜂应用的成本效益。

传粉昆虫的传粉效果可能受到农业景观中的多种因素影响 (表 1)。虽然针对壁蜂的研究并不多, 但是在其他传粉昆虫 (如蜜蜂与熊蜂) 上的研究为如何有效利用壁蜂提供相关依据。农业景观中可能影响授粉效果的因素包括: 1) 在景观中和目标作物同时开花的蜜粉源植物; 2) 当地传粉昆虫群落; 3) 引入壁蜂与捕食性与寄生性天敌的相互作用; 4) 农药的使用带来的影响。

表 1 影响壁蜂授粉性能的农业景观因素
Table 1 Factors of agricultural landscapes affecting the pollination performance by mason bee

农业景观中的因素 Factors in the agricultural landscape	影响 Effect	参考文献 References
蜜粉源植物 Nectar and pollen plants	+	Boyle <i>et al.</i> , 2020
天敌 (捕食者/寄生者) Natural enemy (predator and parasite)	-	Saunders <i>et al.</i> , 2016
当地传粉昆虫群落 Native pollinator community	+	Brittain <i>et al.</i> , 2013
农药使用 Pesticide application	-	Feltham <i>et al.</i> , 2014

+和 - 分别代表正面影响 (Positive impact) 和负面影响 (Negative impact)。

1.1 蜜粉源植物

当目标作物处于花期时, 在半自然栖息地(树篱, 灌木, 草地和森林)也有部分开花植物也处于花期 (Rodríguez *et al.*, 2021)。这些额外的开花植物会对壁蜂产生积极影响, 如提供额外的食物从而提高壁蜂的茧的回收数量 (Boyle and Pitts-Singer, 2019)。充足的蜜粉源植物(包括需要通过授粉增产的目标作物和周围的野生开花植物)可以作为幼虫的额外食物供应, 有助于在目标作物开花期结束后收获更多的壁蜂蜂茧或者得到体型更大的后代个体 (Radmacher and Strohm, 2010)。来自野生植物的花粉和花蜜也增加了食物多样性, 并进一步使壁蜂后代受益 (Centrella *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2021)。与此同时回收更多的蜂茧(后代)可以降低农民应用壁蜂的成本。然而, 其它开花植物也可能通过降低目标作物对雌性壁蜂的吸引力, 从而影响它们对目标作物的授粉效率 (Lundin *et al.*, 2017)。来自其它异种花粉的沉积也可能导致目标作物花粉管堵塞 (Herbertsson *et al.*, 2017), 甚至可能降低目标作物产量。因此, 在使用壁蜂授粉之前, 至少应当确保目标农作物花朵对壁蜂的吸引力远大于周围的野花(可以比较壁蜂在野花和目标作物的访花频率), 否则, 壁蜂应用效果可能不佳。

1.2 当地传粉昆虫群落

在被引入农业景观后, 壁蜂将与农田景观中的各种传粉昆虫(比如蝴蝶、甲虫和食蚜蝇等)共存。因为各种物种之间的行为相互作用可以改变它们的授粉性能, 当地传粉昆虫群落组成可能影响壁蜂授粉对目标作物的贡献 (Greenleaf and Kremen, 2006)。果园中传粉昆虫多样性的增加, 可以通过不同传粉昆虫物种之间的相互作用协同改善作物的授粉服务 (Brittain *et al.*, 2013), 但是同时引入的壁蜂和本地传粉者之间可能存在食物和筑巢资源的竞争 (MacIvor and Packer, 2015)。景观中丰富的传粉昆虫可能导致食物资源枯竭, 特别是当开花植物有限时, 这可能进一步造成壁蜂幼虫的食物不足。因此, 在这些有激

烈竞争的农业景观中应用壁蜂授粉可能不可持续的, 需要每年添加新的壁蜂茧。对于收入稍低的农户来说, 每年购置新的壁蜂茧可能是一个不小的经济负担。因此, 在使用壁蜂授粉之前, 需要专业的科研团队评估收益以及当地政府资金扶持, 从而将农户的可能风险降至最低。

1.3 天敌(捕食者、拟寄生者和病原体)

在农田景观内, 由于捕食者 (Groulx and Forrest, 2018) 和拟寄生蜂的存在对壁蜂造成了巨大威胁 (徐环李, 1994)。调查发现, 壁蜂的寄生蜂主要包括褶翅小蜂 *Leucospis* spp.、长尾小蜂 *Monodontomerus* spp. 和青蜂 *Chrysis* spp. (Bosch and Kemp, 2002)。在春季, 当农业景观中的蜜粉源植物有限时, 不同种类的授粉昆虫如熊蜂和独居蜂, 可以在特定时期的不同时间访问相同的花朵 (Shimizu *et al.*, 2014)。因此, 来自不同物种的个体可以间接地相互接触, 促进了物种间病原体的交叉传播 (Fürst *et al.*, 2014)。在农业景观中, 这些捕食者, 拟寄生蜂和病原体可能对壁蜂的成虫和幼虫构成威胁, 从而对作物和果树授粉效果造成负面影响。因此, 在大规模使用壁蜂授粉之前, 可以在前一年放置少量的壁蜂茧来观察当地农田生态系统是否存在大量的天敌。值得一提的是, 有些天敌是比较容易控制的, 可以通过在巢管下方木棍放置粘胶来防止蚂蚁的捕食 (Staab *et al.*, 2018)。

1.4 农药暴露

当传粉昆虫在农业景观中访花觅食时, 它们一直暴露于各种农药, 包括杀虫剂、杀螨剂、除草剂和杀真菌剂 (Main *et al.*, 2020)。壁蜂在觅食时, 会接触或摄入水、食物(花粉和花蜜)和空气中的农药 (Hladik *et al.*, 2016; Heard *et al.*, 2017)。据报道, 农药会直接杀死成年独居蜂并影响其筑巢和生存 (Fortuin *et al.*, 2021)。如果雌性已从施用杀虫剂的开花作物中收集食物, 则花粉球中作为幼虫食物中的农药残留可能影响壁蜂幼虫的发育 (Sgolastra *et al.*, 2018)。家养蜜蜂幼虫的农药暴露可以被过滤, 而壁蜂幼虫通常取食未加工的花粉球 (Sgolastra *et al.*, 2018)。

此外, 由于壁蜂的觅食范围有限 (Zurbuchen *et al.*, 2010), 其食物选择可能比家养蜜蜂更有限, 并且更有可能暴露于靠近巢穴的开花作物中施用的杀虫剂 (Centrella *et al.*, 2020)。因此, 壁蜂比蜜蜂更容易受到农药的伤害 (Kopit and Pitts-Singer, 2018)。为此, 建议在壁蜂进行授粉工作时减少或暂停施用农药。对农户而言, 有必要在使用壁蜂授粉之前, 评估一下农田景观的农药使用是否适合投放壁蜂。如果农业景观中的农药暴露量很高, 则壁蜂授粉表现以及花期结束时蜂茧回收的数量可能不理想。

2 对当地生态系统中野生传粉昆虫和植物群落的潜在影响

通常来说, 在一个生态系统中引入新的物种可能会对当地生态系统, 特别是本地传粉昆虫和植物群落造成负面影响 (Russo, 2016)。与家养蜜蜂和熊蜂相比, 引入壁蜂依然会对当地生态系统造成影响 (Russo, 2016)。引入的壁蜂 (包括意外和故意引入) 通过与当地传粉昆虫竞争资源, 为入侵植物授粉以及传播寄生蜂和病原体, 从而对当地生态系统产生负面影响 (Russo, 2016)。首先, 如前所述, 外来传粉者和本地传粉者之间存在着食物 (花蜜和花粉) 竞争。意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 和其他独居蜂物种都可以与本地传粉者竞争花粉资源 (Sørensen *et al.*, 2020)。雌蜂的采食行为可能会导致依赖开花作物的野生传粉者的食物消耗, 从而导致传粉者生物多样性的丧失。其次, 引进的壁蜂需要占据当地的芦苇管竹子等筒状结构进行筑巢, 可能与本地野生蜂竞争筑巢材料。再次, 由于引入壁蜂和本土独居蜂可能同为一些寄生蜂的寄主 (Bosch, 1992), 因此, 引进壁蜂蜂茧中的拟寄生蜂可能对整个当地野生巢管蜂种群造成负面影响。此外, 引入的家养蜜蜂可以为外来植物提供授粉服务, 增强了后者的扩散 (Gibbs and Sheffield, 2009; MacIvor *et al.*, 2014)。目前, 在国内并没有关于评估引入壁蜂造成影响的研究 (包括从国外引入国内或从国内将一壁蜂物种引入其他地区), 然而, 调查这些长期影响相对比较困难。

考虑到壁蜂引种潜在的负面影响, 在引入壁蜂, 尤其是需要从国外引入蜂种时需要格外谨慎, 最好在选择壁蜂物种时应优先考虑本地壁蜂。中国本土壁蜂可以作为传粉壁蜂的潜在候选物种很多 (徐环李, 1994)。例如, 一种中国本土的壁蜂, 凹唇壁蜂 *Osmia excavata* 已经被广泛用于苹果、梨和樱桃的传粉 (Wei *et al.*, 2002)。华北地区果农可以直接在农田周围设置空巢管 (通常由晒干的芦苇, 竹子组成), 来吸引本土物种, 帮助它们在目标作物周围筑巢, 繁衍后代。

3 授粉表现

壁蜂是否可以增加作物产量? 能增加多少产量? 这些可能是农户最关心的问题。在确定是否在景观中引入授粉昆虫之前, 需要查明作物是否得到充分的授粉, 即当地授粉昆虫是否已经可以提供足够的授粉服务。农业景观中的野生授粉昆虫群落可以自然地提供授粉服务 (Zou *et al.*, 2017)。然而, 传粉昆虫具有不同的授粉性能, 并可能受到其花偏好、觅食行为及其身体特征的影响 (Ne'eman *et al.*, 2010; Jauker *et al.*, 2012)。因此, 有时即便拥有高度多样性的授粉昆虫组合, 并不能保证足够的授粉服务 (Holland *et al.*, 2020)。在确定作物需要额外授粉服务之后, 我们需要评估壁蜂对该作物的产量贡献。

评估传粉昆虫对作物生产的贡献的实验主要有两种: 传粉昆虫隔离实验或网袋实验 (Pollinator exclusion experiment) 和巢管放置对比实验, 两种方法各有优点和缺点。罩笼实验使用尼龙网袋对目标作物进行昆虫授粉, 通常用于评估目标作物的授粉贡献 (Herrmann *et al.*, 2019)。罩笼实验可以帮助我们更好地了解特定壁蜂物种对作物类型的授粉贡献 (Jauker *et al.*, 2012; Garratt *et al.*, 2014)。此外, 当需要知道目标作物的最佳传粉昆虫密度时, 罩笼实验可能是非常有效的 (Jauker *et al.*, 2012)。然而, 罩笼 (通常由细网制成) 作为物理屏障, 不可避免地会影响作物生长 (Jauker and Wolters, 2008)。除此之外, 罩笼的网状结构可以改变罩笼内的微环境 (环境温度和湿度), 扰乱传粉昆虫的觅食行为, 从而可

能掩盖传粉昆虫对目标作物的真实贡献 (Ouvrard and Jacquemart, 2019)。

另一方法则是直接在目标作物旁放置壁蜂巢管, 然后与未放置巢管的作物产量做对比, 计算壁蜂对农作物的生产的直接贡献 (Ryder *et al.*, 2020)。通过计算购买壁蜂茧和相关设施的费用, 就可估算出引放壁蜂的成本和收益。这对未来应用和管理壁蜂具有指导性作用。在一些研究中, 直接放置壁蜂蜂巢已经被用来评估壁蜂的贡献 (Artz *et al.*, 2013; Pitts-Singer *et al.*, 2018)。此方法能帮助农户和其他利益相关者更直观地在实地了解壁蜂授粉的成本和传粉效益。因此, 除了罩笼实验之外, 我们需要比较在周围放置壁蜂巢管的作物产量和不放置巢管的作物产量的实验, 以更好地评估在一个地区施用壁蜂授粉的必要性。

除了评估壁蜂授粉贡献的方法之外, 农户以及其他利益相关者可能会比较关心蜂茧最佳投放密度的问题 (Zhang *et al.*, 2022a)。以往的一些研究探讨了壁蜂授粉的合适投放密度 (例如, 每单位面积的雌性或每单位树/栽培品种的雌性) (Vicens and Bosch, 2000; Ladurner *et al.*, 2004)。虽然已经发现壁蜂的密度与授粉贡献呈

正相关 (Jauker *et al.*, 2012), 但农民也可能想知道适合其作物的茧密度以达到最佳方案。以苹果授粉为例, 估计为每 355-500 只/hm² 雌性角额壁蜂 *Osmia cornuta* (Vicens and Bosch, 2000) 可以提供足够的授粉。然而, 大多数研究都集中在果园 (Pitts-Singer *et al.*, 2018; Ryder *et al.*, 2020), 而对大田作物, 比如油菜, 合适壁蜂蜂茧投放量尚不清楚。

4 壁蜂授粉与蜜蜂授粉的比较

在分析了壁蜂授粉在农业景观中的成本效益后, 最后有必要将其与蜜蜂 (*Apis mellifera* 和 *A. cerana*) 授粉, 也就是在目标作物附近直接放置蜜蜂蜂箱 (Goodrich and Goodhue, 2020), 进行比较。壁蜂和蜜蜂在授粉应用中的差异如表 2 所示。一些国外研究已经发现, 壁蜂在授粉有效性 (Effectiveness) 和效率方面均优于蜜蜂 (Jauker *et al.*, 2012; Garratt *et al.*, 2014; Eeraerts *et al.*, 2020)。在国内, 已将蜜蜂 (包括中华蜜蜂和意大利蜜蜂) 授粉与壁蜂授粉进行比较, 认为 2 种传粉者在传粉表现方面的差异是由于蜜蜂和壁

表 2 壁蜂和蜜蜂在授粉应用中的差异
Table 2 Differences between mason bees and honey bees in pollination applications

差异事项 Differences	意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera</i>	壁蜂 <i>Osmia</i> spp.
可行性 Feasibility	需要一定的专业知识进行管理; 需要购置或租赁蜜蜂	操作简单; 仅需购置巢管或蜂茧 (王丽娜, 2019)
授粉时间 Pollination period	可以在一年中持续大部分时间	授粉时间有限 (取决于物种的出现时间), 中国本土物种 <i>Osmia excavata</i> 每年只授粉一次
副产品 By-product	蜂蜜; 某些作物的花粉; 其他蜂胶等蜂胶产品	无
可持续性 Sustainability	如果管理得当, 蜂巢可用于明年	如果蜂茧回收数量不足, 还需要额外补充蜂茧
授粉范围 Pollination scale	半径约 1 000 m	取决于物种, 但远低于蜜蜂 (Zurbuchen <i>et al.</i> , 2010)
农药抗性 Resistance to pesticide	中等	低
是否蜇人 Sting or not	是	可能性很低
出勤授粉温度 Foraging temperature	早春温度低时出勤率低	壁蜂在比较低的温度下通常比蜜蜂具有更好的授粉性能 (Ahrenfeldt <i>et al.</i> , 2019), 可能在早春时间授粉效果更佳

蜂具有不同的结构功能和觅食特征(何伟志和周伟儒, 2009; 陈妮等, 2021)。家养蜜蜂通常通过后腿上的花粉篮来收集花粉, 并用花蜜润湿花粉(Thakur and Nanda, 2020)。这导致家养蜜蜂采集的花粉很难沉降到下一朵花上, 授粉效率低。雌性壁蜂没有花粉篮, 但其腹部被毛, 称为“scopa”(Portman *et al.*, 2019)。它们在花朵上爬行时可收集花粉。腹部收集到的花粉可以接触到花朵的每个部分, 有助于转移更多的花粉。因此, 它们比家养蜜蜂具有更好的授粉表现。壁蜂通常觅食范围较短(Zurbuchen *et al.*, 2010), 所以大面积的作物种植可能更需要飞行距离更远的蜜蜂来提供授粉。此外, 家养蜜蜂 *Apis mellifera* 和 *Apis cerana* 能够提供各种蜂产品, 包括蜂蜜、花粉、蜂蜡以及蜂胶; 而除了授粉之外, 壁蜂不能为农民提供这些副产品以增加收入。

5 结论

本文为壁蜂授粉应用提供了一个初步评估思路。农业景观可以改善或削弱壁蜂的授粉性能。在不同农业景观内, 非目标开花植物、当地传粉昆虫群落、天敌(捕食者, 寄生蜂)以及农药使用都会影响壁蜂授粉效用和壁蜂蜂茧的回收。为了提高壁蜂的传粉表现和蜂茧回收率, 我们建议在农田景观内增加半自然生境的比重。当然, 作为引入物种, 我们还需要评估引放壁蜂对当地生态系统的潜在影响。因为引入的壁蜂可能会通过竞争筑巢区域和食物对本土传粉昆虫群落产生负面影响, 同时通过授粉协助入侵植物的在当地生态系统中的扩散。考虑到中国本土具有多种潜在的授粉壁蜂物种, 在应用壁蜂授粉时应尽量使用本土种类。除此之外, 评估壁蜂的授粉效用有罩笼法与壁蜂巢管法。在评估时, 建议综合考量, 兼顾两种方法。最后我们还需要比较壁蜂授粉与蜜蜂授粉的差异, 来帮助利益相关方做出最终决定。虽然壁蜂授粉已在全球范围内使用, 但对其有效性、安全性、成本与产出等方面的评估仍然有限。因此, 未来需要多方位地开展研究以评估壁蜂授粉, 从而更好地推广利用壁蜂授粉这项技术, 让使用者获益。

参考文献 (References)

- Ahrenfeldt EJ, Sigsgaard L, Hansted L, Jensen AC, Toldam-Andersen TB, 2019. Forage quality and quantity affect red mason bees and honeybees differently in flowers of strawberry varieties. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(8): 763–773.
- Aizen MA, Garibaldi LA, Cunningham SA, Klein AM, 2009. How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. *Annals of Botany*, 103(9): 1579–1588.
- Artz DR, Allan MJ, Wardell GI, Pitts-Singer TL, 2013. Nesting site density and distribution affect *Osmia lignaria* (Hymenoptera: Megachilidae) reproductive success and almond yield in a commercial orchard. *Insect Conservation and Diversity*, 6(6): 715–724.
- Bosch J, 1992. Parasitism in wild and managed populations of the almond pollinator *Osmia cornuta* Latr. (Hymenoptera: Megachilidae). *Journal of Apicultural Research*, 31(2): 77–82.
- Bosch J, Kemp WP, 2002. Developing and establishing bee species as crop pollinators: the example of *Osmia* spp. (Hymenoptera: Megachilidae) and fruit trees. *Bulletin of Entomological Research*, 92(1): 3–16.
- Boyle NK, Pitts-Singer TL, 2019. Assessing blue orchard bee (*Osmia lignaria*) propagation and pollination services in the presence of honey bees (*Apis mellifera*) in Utah tart cherries. *PeerJ*, 7: e7639.
- Boyle NK, Artz DR, Lundin O, Ward K, Picklum D, Wardell GI, Williams NM, Pitts-Singer TL, 2020. Wildflower plantings promote blue orchard bee, *Osmia lignaria* (Hymenoptera: Megachilidae), reproduction in California almond orchards. *Ecology and Evolution*, 10(7): 3189–3199.
- Brittain C, Williams N, Kremen C, Klein AM, 2013. Synergistic effects of non-*Apis* bees and honey bees for pollination services. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1754): 20122767.
- Centrella M, Russo L, Moreno Ramírez N, Eitzer B, van Dyke M, Danforth B, Poveda K, 2020. Diet diversity and pesticide risk mediate the negative effects of land use change on solitary bee offspring production. *Journal of Applied Ecology*, 57(6): 1031–1042.
- 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.]
- Eeraerts M, Smagghe G, Meeus I, 2020. Bumble bee abundance and richness improves honey bee pollination behaviour in sweet cherry. *Basic and Applied Ecology*, 43: 27–33.
- Everaars J, Strohbach MW, Gruber B, Dormann CF, 2011. Microsite conditions dominate habitat selection of the red mason bee

- (*Osmia bicornis*, Hymenoptera: Megachilidae) in an urban environment: A case study from Leipzig, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 103(1): 15–23.
- Feltham H, Park K, Goulson D, 2014. Field realistic doses of pesticide imidacloprid reduce bumblebee pollen foraging efficiency. *Ecotoxicology*, 23: 317–323.
- Fortuin CC, McCarty E, Gandhi KJK, 2021. Acute contact with imidacloprid in soil affects the nesting and survival success of a solitary wild bee, *Osmia lignaria* (Hymenoptera: Megachilidae). *Chemosphere*, 264: 128572.
- Fürst MA, McMahon DP, Osborne JL, Paxton RJ, Brown MJF, 2014. Disease associations between honeybees and bumblebees as a threat to wild pollinators. *Nature*, 506(7488): 364–366.
- Garratt MPD, Coston DJ, Truslove CL, Lappage MG, Polce C, Dean R, Biesmeijer JC, Potts SG, 2014. The identity of crop pollinators helps target conservation for improved ecosystem services. *Biological Conservation*, 169: 128–135.
- Gibbs J, Sheffield CS, 2009. Rapid range expansion of the wool-carder bee, *Anthidium manicatum* (Linnaeus) (Hymenoptera: Megachilidae), in north America. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 82(1): 21–29.
- Goodrich BK, Goodhue RE, 2020. Are all colonies created equal? The role of honey bee colony strength in almond pollination contracts. *Ecological Economics*, 177: 106744.
- Greenleaf SS, Kremen C, 2006. Wild bees enhance honey bees' pollination of hybrid sunflower. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(37): 13890–13895.
- Groulx AF, Forrest JRK, 2018. Nesting aggregation as a predictor of brood parasitism in mason bees (*Osmia* spp.). *Ecological Entomology*, 43(2): 182–191.
- He WZ, Zhou WR, 2009. *Osmia excavata*, *Apis mellifera* and human pollination for apple pollination research. *Apiculture of China*, 60(11): 9–15. [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): 9–15.]
- Heard MS, Baas J, Dorne JL, Lahive E, Robinson AG, Rortais A, Spurgeon DJ, Svendsen C, Hesketh H, 2017. Comparative toxicity of pesticides and environmental contaminants in bees: Are honey bees a useful proxy for wild bee species? *Science of the Total Environment*, 578: 357–365.
- Herbertsson L, Gåvertsson I, Klatt BK, Smith HG, 2017. Assessing the risk of stigma clogging in strawberry flowers due to pollinator sharing with oilseed rape. *Journal of Pollination Ecology*, 21(2): 71–77.
- Herrmann JD, Beye H, de la Broise C, Hartlep H, Diekötter T, 2019. Positive effects of the pollinators *Osmia cornuta* (Megachilidae) and *Lucilia sericata* (Calliphoridae) on strawberry quality. *Arthropod-Plant Interactions*, 13(1): 71–77.
- Hladik ML, Vandever M, Smalling KL, 2016. Exposure of native bees foraging in an agricultural landscape to current-use pesticides. *Science of the Total Environment*, 542: 469–477.
- Holland JM, Sutter L, Albrecht M, Jeanneret P, Pfister SC, Schirmel J, Entling MH, Kaasik R, Kovacs G, Veromann E, Bartual AM, Marini S, Moonen AC, Szalai M, Helsen H, Winkler K, Lof ME, van der Werf W, McHugh NM, Smith BM, Masonis DW, Cresswell JE, 2020. Moderate pollination limitation in some entomophilous crops of Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302: 107002.
- Jauker F, Bondarenko B, Becker HC, Steffan-Dewenter I, 2012. Pollination efficiency of wild bees and hoverflies provided to oilseed rape. *Agricultural and Forest Entomology*, 14(1): 81–87.
- Jauker F, Wolters V, 2008. Hover flies are efficient pollinators of oilseed rape. *Oecologia*, 156(4): 819–823.
- Kopit AM, Pitts-Singer TL, 2018. Routes of pesticide exposure in solitary, cavity-nesting bees. *Environmental Entomology*, 47(3): 499–510.
- Ladurner E, Recla L, Wolf M, Zelger R, Burgio G, 2004. *Osmia cornuta* (Hymenoptera Megachilidae) densities required for apple pollination: A cage study. *Journal of Apicultural Research*, 43(3): 118–122.
- Li YF, Cui YL, Deng FG, Fang L, 2018. Mason bee pollination research in kiwi orchard in Deyang district. *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 L, Li LL, Ouyang F, Li C, Yu Y, Qu CH, Qu ZL, Men XY, Ye BH, 2019. Assessment for pollination services of *Osmia excavata* pollination on pear in Shandong province. *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, 2019. 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.]
- Lu HH, Dou FY, Hao YJ, Li Y, Zhang K, Zhang H, Zhou ZY, Zhu CD, Huang DY, Luo AR, 2021. Metabarcoding analysis of pollen species foraged by *Osmia excavata* Alfken (Hymenoptera: Megachilidae) in China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9: 730549.
- Lundin O, Ward KL, Artz DR, Boyle NK, Pitts-Singer TL, Williams NM, 2017. Wildflower plantings do not compete with neighboring almond orchards for pollinator visits. *Environmental Entomology*, 46(3): 559–564.
- Lv LS, Meng YL, Jin DY, 2002. *Osmia cornifrons* pollination for Pingguoli pear. *China Fruits*, 2002(4): 5–7. [吕龙石, 孟艳玲, 金大勇, 2002. 苹果梨角额壁蜂授粉试验. 中国果树, 2002 (4): 5–7.]
- MacIvor JS, Cabral JM, Packer L, 2014. Pollen specialization by solitary bees in an urban landscape. *Urban Ecosystems*, 17(1): 139–147.
- Ma ZF, Guo MZ, Wang RH, Wang ZM, 2012. Study on pollination by *Osmia cornifrons* on nectarine in solar house. *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.]

- Main AR, Hladik ML, Webb EB, Goynes KW, Mengel D, 2020. Beyond neonicotinoids-Wild pollinators are exposed to a range of pesticides while foraging in agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 742: 140436.
- Ne'eman G, Jürgens A, Newstrom-Lloyd L, Potts SG, Dafni A, 2010. A framework for comparing pollinator performance: Effectiveness and efficiency. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 85(3): 435–451.
- Ouvrard P, Jacquemart AL, 2019. Review of methods to investigate pollinator dependency in oilseed rape (*Brassica napus*). *Field Crops Research*, 231: 18–29.
- Pitts-Singer TL, Artz DR, Peterson SS, Boyle NK, Wardell GI, 2018. Examination of a managed pollinator strategy for almond production using *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) and *Osmia lignaria* (Hymenoptera: Megachilidae). *Environmental Entomology*, 47(2): 364–377.
- Portman ZM, Orr MC, Griswold T, 2019. A review and updated classification of pollen gathering behavior in bees (Hymenoptera, Apoidea). *Journal of Hymenoptera Research*, 71: 171–208.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE, 2010. Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(6): 345–353.
- Radmacher S, Strohm E, 2010. Factors affecting offspring body size in the solitary bee *Osmia bicornis* (Hymenoptera, Megachilidae). *Apidologie*, 41(2): 169–177.
- Rodríguez SS, Pérez-Giraldo LC, Vergara PM, Carvajal MA, Alaniz AJ, 2021. Native bees in Mediterranean semi-arid agroecosystems: Unravelling the effects of biophysical habitat, floral resource, and honeybees. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 307: 107188.
- Russo L, 2016. Positive and negative impacts of non-native bee species around the world. *Insects*, 7(4): 64.
- Ryder JT, Cherrill A, Prew R, Shaw J, Thorbek P, Walters KFA, 2020. Impact of enhanced *Osmia bicornis* (Hymenoptera: Megachilidae) populations on pollination and fruit quality in commercial sweet cherry (*Prunus avium* L.) orchards. *Journal of Apicultural Research*, 59(1): 77–87.
- Saunders ME, Peisley RK, Rader R, Luck GW, 2016. Pollinators, pests, and predators: Recognizing ecological trade-offs in agroecosystems. *Ambio*, 45: 4–14.
- Sedivy C, Dorn S, 2014. Towards a sustainable management of bees of the subgenus *Osmia* (Megachilidae; *Osmia*) as fruit tree pollinators. *Apidologie*, 45(1): 88–105.
- Sgolastra F, Hinarejos S, Pitts-Singer TL, Boyle NK, Joseph T, Lückmann J, Raine NE, Singh R, Williams NM, Bosch J, 2018. Pesticide exposure assessment paradigm for solitary bees. *Environmental Entomology*, 48(1): 22–35.
- Shimizu A, Dohzono I, Nakaji M, Roff DA, Miller DG, 3rd, Osato S, Yajima T, Niitsu S, Utsugi N, Sugawara T, Yoshimura J, 2014. Fine-tuned bee-flower coevolutionary state hidden within multiple pollination interactions. *Scientific Reports*, 4: 3988–3988.
- Sørensen PB, Strandberg B, Bruus M, Kjær C, Larsen S, Hansen RR, Damgaard CF, Strandberg M, 2020. Modelling risk of competitive effects from honeybees on wild bees. *Ecological Indicators*, 118: 106749.
- Staab M, Pufal G, Tschardt T, Klein AM, 2018. Trap nests for bees and wasps to analyse trophic interactions in changing environments-A systematic overview and user guide. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(11): 2226–2239.
- Stein K, Coulibaly D, Stenchly K, Goetze D, Porembski S, Lindner A, Konaté S, Linsenmair EK, 2017. Bee pollination increases yield quantity and quality of cash crops in Burkina Faso, West Africa. *Scientific Reports*, 7: 17691.
- Thakur M, Nanda V, 2020. Composition and functionality of bee pollen: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 98: 82–106.
- Vicens N, Bosch J, 2000. Pollinating efficacy of *Osmia cornuta* and *Apis mellifera* (Hymenoptera: Megachilidae, Apidae) on 'red delicious' apple. *Environmental Entomology*, 29(2): 235–240.
- Wang LN, 2019. The impact of management on *Osmia excavata* pollination and offspring sex allocation. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agriculture University. [王丽娜, 2019. 人工管理措施对苹果园凹唇壁蜂授粉及后代性别分配模式的影响. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Wei SG, Wang R, Smirle MJ, Xu HL, 2002. Release of *Osmia excavata* and *Osmia jacoti* (Hymenoptera: Megachilidae) for apple pollination. *The Canadian Entomologist*, 134(3): 369–380.
- Xu HL, 1994. *Sapyga coma*-Dangerous parasite wasp for mason bee. *China Fruits*, 1994(2): 26–27. [徐环李, 1994. 叉唇寡毛土蜂-果树授粉壁蜂的危险寄生蜂. 中国果树, 1994(2): 26–27.]
- Xu HL, Wu YR, Zhou WR, Wei SG, Wang T, 1994. Biological study on pollinators of fruit trees-*Osmia jacoti*, *Osmia excavata*. *Journal of Fruit Science*, 11(3): 153–156. [徐环李, 吴燕如, 周伟儒, 魏枢阁, 王涛, 1994. 果树授粉昆虫-紫壁蜂、凹唇壁蜂生物学研究. 果树科学, 11(3): 153–156.]
- Zhang K, Li Y, Sun K, Bao J, He C, Hou X, 2022a. Supplementary honey bee (*Apis mellifera* L.) pollination enhances fruit growth rate and fruit yield in *Paeonia ostii* (family: Paeoniaceae). *PLoS ONE*, 17(8): e0272921.
- Zhang H, Han C, Breeze TD, Li M, Mashilingi SK, Hua J, Zhang W, Zhang X, Zhang S, An J, 2022b. Bumblebee pollination enhances yield and flavor of tomato in Gobi Desert greenhouses. *Agriculture*, 12(6): 795.
- Zou Y, Bianchi FJJA, Jauker F, Xiao HJ, Chen JH, Cresswell J, Luo SD, Huang JK, Deng XZ, Hou LL, van der Werf W, 2017. Landscape effects on pollinator communities and pollination services in small-holder agroecosystems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 246: 109–116.
- Zurbuchen A, Landert L, Klaiber J, Müller A, Hein S, Dorn S, 2010. Maximum foraging ranges in solitary bees: Only few individuals have the capability to cover long foraging distances. *Biological Conservation*, 143(3): 669–676.