环境昆虫学报 2022，44（5）：1143－1153
Journal of Environmental Entomology
http：//hjkcxb. alljournals. net
doi：10. 3969/j. issn. 1674－0858. 2022. 05. 8



田丽霞，王甦，方锡红，徐希莲. 传粉蜂在设施农业中的应用及挑战［J］. 环境昆虫学报，2022，44（5）：1143－1153.

传粉蜂在设施农业中的应用及挑战

田丽霞[1]，王　甦[1]，方锡红[2*]，徐希莲[1*]
（1. 北京市农林科学院，北京 100097；2. 北京市蚕业蜂业管理站，北京 100120）

摘要：昆虫为植物传粉是自然生态系统中的重要环节，在农业和自然生态系统的平衡与调控方面发挥着重要作用。以蜜蜂、熊蜂为代表的传粉蜂因其高效传粉及可人工饲养的特点，已成为设施农业中的优势传粉昆虫。本文总结了传粉蜂在设施农业中的应用现状，并从温湿度、农药、重金属等非生物因素和蜂种、病原生物、天敌、蜜源植物等生物因素两大方面讨论了传粉蜂在应用中面临的诸多挑战。此外，本文初步探讨了植物病虫害对传粉昆虫传粉效率的影响，并对传粉蜂未来的研究和应用方向进行了展望，旨在推动实现传粉蜂在农业中的高效授粉功能，为农产品增产增效服务。

关键词：蜂；传粉；应用；因素
中图分类号：Q968. 1；S89　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674－0858（2022）05－1143－11

Applications and challenges of bee pollination in facility agriculture

TIAN Li-Xia[1], WANG Su[1], FANG Xi-Hong[2*], XU Xi-Lian[1*] (1. Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Beijing Apiculture Silkworm Administrative Centre, Beijing 100120, China)

Abstract: Insect pollination is the important process in the natural ecosystem and plays as vital role in the balance and manipulation of the both agricultural and natural ecosystem. Known as their remarkable characteristics of high pollinating ability and adapted for artificial breeding, pollinating bees, include honeybee and bumblebee have been identified as dominant pollinators in facility agricultural system. We summarize the application progress of pollinating bees at present and discuss the various challenges once the pollinators may be faced in practical application from both biotic effectors (as bee species, pathogen, natural enemy, nutrition plant and etc.) and abiotic effectors (as temperature and humidity, pesticide, heavy metal and etc.). Furthermore, we preliminarily discuss the impacts of plant diseases and herbivores to the pollination efficiency by bees and indicate the necessary hotspots for both research and application in future. Our aim is to promote the realization of the efficient pollination function of bees in agriculture, and the yield increasing and quality improving of agricultural products.

Key words: bees; pollination; application; factors

传粉昆虫为植物授粉是自然生态系统中的重要环节，在农业生态系统中也发挥着重大作用，昆虫因独特的传粉功能，使之成为保证野生植物异花传粉和主要作物生产的重要因素（Garibaldi

基金项目：国家自然基金（32001904）；北京市科技计划课题（Z181100009818022）；北京市农林科学院青年科研基金（QNJJ202211）
作者简介：田丽霞，女，山东泰安人，博士研究生，助理研究员，研究方向为传粉蜂应用研究，E－mail：tianlixia555@126. com
*共同通讯作者 Author for correspondence：方锡红，男，研究方向为蜂产品及蜂授粉应用研究，E－mail：fxh013@126. com；徐希莲，女，副研究员，研究方向为蜜蜂、熊蜂生物学研究及授粉应用，E－mail：377466007@qq. com
收稿日期 Received：2021－06－11；接受日期 Accepted：2021－08－18

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

et al.，2016；Potts *et al.*，2016；Powney *et al.*，2019）。Gallai 等（2009）对蜜蜂等传粉昆虫在全球农作物种植区中的地位进行了分析，结果表明，世界各地的农作物生产都依赖于昆虫授粉。昆虫传粉不仅提高产量，还会改善农作物的脂肪酸和维生素 E 等营养成分（Brittain *et al.*，2014）。

随着农作物品种的改良和种植技术的优化，农产品的产量和品质不断提升，设施农业因其精准高效的管理及可调控环境等优势，已是现代农业的重要形式，中国的设施农业面积和产量均居世界第一（丁小明等，2017）。截至 2019 年年底，我国设施蔬菜人均蔬菜占有量达到全年人均蔬菜占有量的 14%，为“菜篮子工程”和维持全年蔬菜供应的多样性做出重大贡献（杜睿和杜振永，2020）。十三五期间，我国积极发展设施蔬菜，实施园艺产品提质增效工程，集成推广绿色高质高效技术模式，“菜篮子”产品实现稳定供应。其中，在番茄、辣椒、草莓、西瓜等蔬果的设施生产中，因难以借助自然风和其他生物传粉，为了保证作物授粉和结果率，授粉成为一项关键环节，常用的授粉方式主要分为激素蘸花、振动授粉器等人工授粉和蜜蜂、熊蜂等昆虫授粉。虽然人工授粉可以在一定程度提高座果率，但是因需人工导致成本高，而且操作不当的话，极易造成畸形果、空洞果及病害发生等问题（李宝聚和朱国仁，1999；孙艳军等，2017）。而花期释放蜜蜂、熊蜂等昆虫，在其访花的同时可以为作物的高效授粉，可实现作物产量增加和营养成分改善（Brittain *et al.*，2014）。

传粉昆虫的种类繁多，其中最主要的传粉昆虫是膜翅目蜜蜂科的蜂类，可以为设施农业中多种作物进行授粉，目前已实现人工饲养的两大类主要的传粉蜂分别是蜜蜂（如意大利蜜蜂 *Apis mellifera*、中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* 等）和熊蜂（欧洲地熊蜂、红光熊蜂 *Bombus*（*s. str.*）*ignitus* 等）。蜜蜂是膜翅目蜜蜂科的传粉昆虫，是自然界中最主要的授粉昆虫，在全球分布广泛，经过饲养和驯化，可以高效地为多种农作物授粉。而熊蜂是蜜蜂科熊蜂属的一类重要的传粉昆虫，因其个体大、浑身绒毛、喙长、耐低温、趋光性弱和声震传粉等特性，成为设施作物尤其是茄果类蔬菜的理想传粉者（Velthuis and van Doorn，2006）。

采用蜂授粉可减少化学激素污染，省时省力，提质增效，是世界公认的绿色食品安全生产中的一项不可或缺的措施。近年来随着农业产业发展与提质增效需求的快速提高，传粉蜂的市场需求与科研投入日益增长。本文综述了国内外近年来传粉蜂在农业上的主要应用，同时重点探讨了影响传粉蜂使用效率的主要因素，旨在为我国农业生产上高效利用传粉蜂服务。

1 传粉蜂在设施农业中的应用

近年来，随着农业生产逐步向精准化、高效化发展，设施农业作为一类以高技术、新品种为支撑的农业生产形式，已经在农业生产中占有极为重要的地位。在温室这一相对封闭的环境中，种植措施管理较为严格，作物依靠自然风和昆虫传粉受到限制，为了保证作物授粉和结果率，就需要增加授粉措施，蜜蜂、熊蜂等传粉蜂因其高效传粉及可人工饲养、周年供应等特点，已成为设施农业中的优势传粉昆虫，广泛应用于蔬菜、果树的坐果及多种作物的制种过程中。

1.1 蔬菜作物

蜂授粉技术在果菜类蔬菜生产上有着广泛的应用。其中，番茄是一种在全球广泛栽植的果菜类作物，高效的授粉是保证其高产的前提，与激素蘸花和振动授粉相比，蜂授粉植株座果率高，畸形果率低，可溶性固形物和 VC 含量高，商品性好，效益高（安建东等，2005；郑子南等，2019；尤春等，2020）。全球每年有上百万群熊蜂为农作物授粉，其中 95% 以上用于设施番茄授粉（Velthuis and van Doorn，2006）。辣椒虽然是自花授粉作物，但是研究表明，蜜蜂或熊蜂授粉后的辣椒单果重和结实率均增加，利用生物经济的方法分析后指出，我国辣椒经两种蜂授粉后的经济效益会产生可观的增加（罗术东等，2015）。

西瓜是全球广泛种植的农作物，中国是世界上最大的西瓜产地，西瓜雌雄同株异花，对传粉昆虫的依赖性强，经蜂授粉后，产量和结子率都有显著提升（Free，1993；Adlerz，1996），目前蜜蜂授粉已广泛应用在西瓜生产上。草莓作为另一种老百姓喜爱的日常水果，在我国也有很大的种植面积，有些草莓品种可以自花结实，但是一些品质好的品种常因雄蕊短柱头高而需要辅助授粉，设施草莓利用蜂授粉替代人工授粉，不仅减少劳动力，还提高产量和品质。有研究指出，中国本土熊蜂可以有效为草莓授粉，效果甚至优于蜜蜂

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和欧洲地熊蜂（李继莲等, 2006；陈文锋等, 2011；张亚利, 2013）。此外，黄瓜、冬瓜等多种蔬菜的种植上都在尝试应用蜂授粉技术（国占宝等, 2003；Motzke *et al.*, 2015）。

1.2　果树作物

果树是农业生产上的重要作物，果品的提早成熟和上市在一定程度可以创造更高的经济价值。设施果树可以达到这一目的，因为设施相对封闭的环境，作物的花授粉后才会刺激子房壁膨大形成果实，授粉蜂在设施果树产业中就起到至关重要的作用。樱桃因其开花早、成熟早而成为早春重要的鲜食水果，我国已成为世界甜樱桃种植面积和消费量最大的国家（王雯慧, 2018）。樱桃是一种高度依赖昆虫传粉的果树，尤其是在设施樱桃的种植中，壁蜂 *Osmia cornifrous* 和蜜蜂可以有效的为樱桃授粉（肖云丽等, 2019）。虽然蜜蜂占樱桃上访花昆虫的 2/3，但是其他野生蜂的传粉对樱桃座果和产量也十分重要，这就呼吁种植户注重保护果园附近的生态环境，让更多的传粉蜂可以栖息和繁殖（Holzschuh *et al.*, 2012）。还有研究指出，同时释放熊蜂和蜜蜂，熊蜂会提高蜜蜂的访花积极性，达到更好的授粉效果（Eeraerts *et al.*, 2020）。另一种重要的果树是梨树，梨多为自花不育，需要辅助授粉，人工授粉的话需要先收集花粉后再进行授粉，成本高，但是利用蜜蜂授粉可以显著提高座果率和产量（Stern *et al.*, 2004）。猕猴桃因其富含维生素而备受大众喜爱，因其是雌雄异花的果树，需要依赖风或者昆虫传粉，但是风力传粉的座果率和果实产量远不如蜜蜂授粉的效果，虽然猕猴桃花因缺乏蜜腺而对蜜蜂吸引力较弱，但是，通过合适的诱导后，蜜蜂尤其是中华蜜蜂可以高效地为猕猴桃授粉（Costa *et al.*, 1993；Pozo *et al.*, 2018；韩胜明等, 2020）。

1.3　作物制种

蜜蜂、熊蜂等传粉蜂在多种作物的制种工作中也有广泛的应用。如熊蜂可以显著提高西蓝花杂交制种的效率，单株有效荚数、每荚粒数、单株和亩产量都显著提升（檀国印等, 2020）。传粉蜂也已应用于棉花、大白菜、油菜、西瓜等作物的杂交育种工作中（杨恒山等, 2002；邢朝柱等, 2005；侯燕等, 2008；苏永全等, 2013）。

此外，在一些经济作物如油料作物（油菜、向日葵、油茶、油用牡丹等）的生产上，有时也在设施中进行，这些作物从种子中来获取和加工成食用油后供给人类使用，但是，种子获得的前提是完成高效授粉，这就需要传粉蜂的参与。比如，向日葵是高度依赖授粉昆虫的作物，蜜蜂等传粉蜂不仅提高了向日葵种子产量，还很大程度提升了种子产油中的维生素 E、不饱和脂肪酸等营养物质含量（Parker *et al.*, 1981；Greenleaf and Kremen, 2006；Silva *et al.*, 2018）。蜜蜂为油菜授粉已得到广泛应用，经蜂授粉后的油菜籽产量、发芽率和出油率均得到显著提高，而且种子畸形率下降一半以上（汪礼国等, 2011）。近些年，茶籽油和牡丹籽油不断占据市场，熊蜂是油茶的有效授粉昆虫，能显著提高座果率和产量，提升其经济价值（赵博光等, 2018）。此外，通过对油用牡丹上的主要访花昆虫调查和研究发现，意大利蜜蜂是其有效访花昆虫，可以高效授粉，提高结子率和种子质量（罗长维等, 2019）。

传粉昆虫在为植物授粉的同时，还可以同时传播生防微生物，实现对植物病虫害的防治（Kim *et al.*, 2019）。有研究人员通过熊蜂携带上白僵菌和粉红粘帚霉，为番茄和辣椒授粉的同时，还实现了防治温室白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* 和灰霉病（Kapongo *et al.*, 2008）。这在设施农业这一相对封闭的环境中，可以得到很好的应用。2019 年，美国环保署批准首个用于经济作物的以蜜蜂为传播载体的生物农药杀菌剂（活性成分——真菌粉红粘帚霉）（杨光, 2019）。

2　传粉蜂面临的挑战

虽然传粉蜂可以有效地为农作物授粉，但在应用过程中，有很多因素影响其传粉效率，下面主要从非生物因素和生物因素两方面进行探讨。

2.1　非生物因素

2.1.1　温湿度及光照

传粉蜂为作物授粉需要在适宜的温湿度条件下，才能实现高的授粉效率和效果。其中，中华蜜蜂在外界气温达到 7℃以上开始外出采集，意大利蜜蜂在外界气温降到 13℃时就会不再出巢采集，温度超过 40℃的话，中华蜜蜂和意大利蜜蜂基本会停止采集花粉，通过采水回巢和在巢内振翅扇风降低巢温（刘守礼, 2013）。熊蜂在外界气温达到 8℃就可出巢采集，授粉的适宜温度为 10 ~ 25℃，此时蜂箱中的幼虫发育良好，花粉需求量大，工蜂采粉积极性较高，授粉效果好，若温度

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

超过 30℃，会造成幼虫发育不良甚至死亡，蜂群对花粉的需求量下降，超过 35℃时，熊蜂访花积极性下降，不利于作物授粉（方萍萍等，2019；檀国印等，2020）。

温室中的土壤水分蒸发和作物蒸腾作用都会产生大量的水蒸气，导致温室中湿度过大，易造成蜂箱发霉、蜂群发育缓慢、易感病等不良后果，所以，应用传粉蜂在温室中授粉时，要及时通风来调控湿度。此外，温湿度还会影响蜂群病虫害的传播和发生（Le Conte and Navajas，2008；Schweiger *et al.*，2010）。

此外，蜂有很强的趋光性，这就导致如果晴天光线强时放蜂的话，容易发生撞棚，造成蜂群损失，因此，温室用蜂时最好在傍晚放蜂进棚，静置一段时间再把蜂箱巢门打开（徐希莲等，2009）。

2.1.2 农药

在设施农业生产上，高温高湿的环境极易导致作物病虫草害的发生，这就避免不了杀虫剂、杀菌剂和除草剂的使用，这些农药常以喷施、灌根、种子包衣等方式施用，最终会通过花粉、花蜜、空气、土壤和水等途径被蜜蜂等传粉蜂接触，并对其造成致命性的损伤。

杀虫剂已经普遍被认为对传粉蜂的生存和传粉是不利的。目前新烟碱类和菊酯类等多种杀虫剂均是设施农业生产中普遍使用的杀虫剂，研究表明，低剂量的新烟碱类杀虫剂会显著降低熊蜂的觅食积极性（Lamsa *et al.*，2018），而且，蜜蜂和熊蜂不能鉴别出食物中是否含有杀虫剂，因此，残留有杀虫剂的农作物对于传粉蜂有相当大的危害（Kessler *et al.*，2015；Arce *et al.*，2018）。新烟碱类杀虫剂还会干扰熊蜂的神经元功能，从而影响熊蜂种群的正常生长（Moffat *et al.*，2015）。近期，有研究人员评估了吡虫啉、呋虫胺、噻虫嗪等 8 种新烟碱类杀虫剂对地熊蜂工蜂毒性及风险，结果表明，吡虫啉、噻虫嗪、呋虫胺、噻虫胺、烯啶虫胺这 5 种杀虫剂对于地熊蜂为高毒（王烁等，2020）。鉴于新烟碱类杀虫剂对传粉蜂的毒害性，欧盟已禁用了部分此类药剂。于是大家试图寻找可替代烟碱类药物的农药，其中，氟啶虫胺腈作为新烟碱类功能相似的杀虫剂被推出，但是，经田间喷后，发现其对熊蜂的繁殖力也产生显著的毒性，导致工蜂及后代数量显著下降，因此，该药并不能成为替代新烟碱类杀虫剂的安全品（Siviter *et al.*，2018）。除了新烟碱类杀虫剂外，毒死蜱、乐果也被报道会造成蜜蜂蜂群高死亡率（Calatayud-Vernich *et al.*，2019）。研究表明，用含有噻虫胺、拟除虫菊酯和 β-氟氯氢菊酯的种衣剂处理开花作物的种子的话，对蜜蜂和熊蜂种群生长和繁殖十分不利（Rundlof *et al.*，2015；Woodcock *et al.*，2017）。因此，目前常用的杀虫剂普遍会对传粉蜂生长和行为产生严重的不良影响。

杀菌剂在设施农作物生长中用于防治因高温高湿等引起的病害，虽然认为大多数杀菌剂对蜜蜂低毒，但是，近些年，咪鲜胺对中华蜜蜂的急性经口毒性为高毒，急性接触毒性为中毒，腈菌唑和丙环唑对中华蜜蜂的急性经口毒性和急性接触毒性均为中毒（王雅珺等，2017）。周浩等（2016）对 6 种温室中常用的杀菌剂对地熊蜂的毒力进行了测定，发现地熊蜂对四霉素较敏感，表现为中等毒性。此外，部分杀菌剂还会与新烟碱杀虫剂等其他农药发生互作，产生协同增效作用，进而加大对蜜蜂、熊蜂等传粉蜂的毒性（Goulson *et al.*，2015；韩文素等，2017；Raimets *et al.*，2018）。

除草剂是除了杀虫剂和杀菌剂外，在农业生产上常用的农药之一，大部分除草剂如乙酸弗草醚、苯磺隆、烟嘧磺隆多元复配除草剂等对成年蜜蜂都是低毒的（王成菊等，2005；游泳等，2018），但是，也有研究指出，除草剂草甘膦对蜜蜂幼虫的存活率、发育速率造成负面影响。所以，蜜蜂采集含有除草剂的花粉花蜜回巢后，虽然对成年工蜂低毒，但是会危害幼虫生长和种群发育（Dai *et al.*，2018）。

2.1.3 重金属

重金属污染如镉、铜、镍、铅、砷、锌等已成为全球环境污染的重要来源，环境中的重金属有诸多来源，如各类化合物的工业合成及使用、汽车尾气、化肥、农药、农膜等，都会造成重金属在土壤、水源和空气中积累（Taylor，1997；郑喜珅等，2002）。重金属污染具有长期性、隐蔽性和不可逆等特点，而且，重金属离子会在生态系统中积累并沿生物链进行传递，重金属在植物体内积累的现象已有明确的认识（Meindl *et al.*，2014a；Hladun *et al.*，2015）。其中，重金属会在花中积累，多个研究结果表明，硒、镍会在植物的花中富集（Hladun *et al.*，2011；Prins *et al.*，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2011；Meindl *et al.*，2014b），也有研究通过向盆栽胡萝卜的土壤中添加镉、铜、铅 3 种重金属溶液后，在植物花中发现这 3 种重金属的积累（Di *et al.*，2016）。

重金属在昆虫体内积累过量时，会影响蜜蜂等昆虫正常的新陈代谢功能，甚至形成毒害作用，导致蜜蜂死亡（Hladun *et al.*，2013；Di *et al.*，2016）。美国加州大学的研究团队通过检测镉、铜、砷对欧洲地熊蜂的致死率和肠道共生菌的影响，指出这些重金属元素对熊蜂会产生不利影响（Rothmanab *et al.*，2020）。当蜂箱置于含有大量砷和镉的工业地区周边时，蜜蜂种群的繁殖力会显著下降（Bromenshenk *et al.*，1985）。研究表明，硒能够降低意大利蜜蜂的相对增长指数，延长其发育历期（Hladun *et al.*，2013）。通过给幼虫和采蜜工蜂饲喂含不同浓度重金属的饲料发现，镉、铜、铅对意大利蜜蜂的幼虫和觅食蜂有较高的致死率（Di *et al.*，2016）。此外，镉会降低蜜蜂的免疫力，造成蜜蜂更容易染病（Polykretis *et al.*，2016）。土壤中的铅在向日葵花中发生积累后，导致蜂类单花访花时间减少（Sivakoff *et al.*，2017）。

总之，自然界中的传粉昆虫可以通过空气、水体、土壤、植物等多种途径接触重金属，重金属在蜜蜂等传粉昆虫体内累计，不仅影响个体的生长发育，还会对种群造成严重危害，影响传粉效率。

2.2　生物因素

2.2.1　传粉蜂本身群势情况

传粉蜂的蜂群大小直接影响传粉效率，传粉蜂数量不足的话，会造成授粉不足，影响座果率和果实品质，而蜂群过大时，易造成授粉过度，形成畸形果等不良后果，此外，因群势过大，温室中作物的花不能满足蜂群需要，部分蜂试图飞出温室，也会发生撞棚的问题，造成蜂群损伤（姜仁涛，2004）。以蜜蜂为例，群势较大的蜂群，群内有较多数量的成年蜂从事采集活动，而且蜜蜂对花蜜的偏好性更强，大群的蜜蜂可用于蜜多粉少或者花蜜花粉都多的植物授粉（李江红，2015）。小群势的蜜蜂蜂群以幼虫发育为主，对花粉需求大，成年蜂会进行大量采粉工作，可以利用含 2 脾左右幼虫的 3 ~ 4 脾蜂群为粉多蜜少类作物授粉（李江红，2015）。

2.2.2　病原生物及天敌

传粉昆虫的主要病虫害包括寄生性虫害（如寄生蜂、寄生螨）、细菌、真菌、病毒等侵染性病害。以蜜蜂和熊蜂为例，我国每年因蜜蜂病虫害造成蜂死亡，蜂群损失 30% 以上，严重影响授粉效率，进而造成作物授粉不充分而减产（王强等，2013）。

寄生性虫害是威胁蜂群的重要原因之一。以蜜蜂为例，狄斯瓦螨 *Varroa destructor* 是一种常发生的寄生螨，在个体水平和群体水平都会对幼年蜂、成年蜂及蛹都造成严重的、甚至是致命的影响（Le Conte *et al.*，2010；Rosenkranz *et al.*，2010；李文峰和韩日畴，2020）。对于熊蜂蜂群，寄生蜂和寄生蝇也是危害其蜂群的重要因素，其中，拟孔蜂巨柄啮小蜂 *Melittobia acasta* 和欧蚁蜂 *Mutilla europaea* 是已报道的主要寄生蜂，在中国西南地区主要寄生短头熊蜂 *Bombus*（*Alpigenobombus*）*breviceps*（Smith，1852）和红尾熊蜂的雄性蛹，导致雄性蜂数量下降，蜂王不能及时交配，最终导致蜂群衰退（Su *et al.*，2019）。

病毒病的发生往往对蜂群造成毁灭性影响，如蜜蜂残翅病毒（*Deformed wing virus*，DWV）是目前在蜜蜂中最常发生的病毒之一，在全球三十几个国家均有发生，能够侵染各个发育阶段的蜜蜂，严重时导致蜂蛹发育缓慢，体型萎缩，蜂群早衰，该病毒不仅危害蜜蜂，对熊蜂在内的其他 65 种节肢动物也有很强的侵染性（Martin *et al.*，2019）。囊状幼虫病毒（*Sacbrood virus*，SBV）则是一类严重危害中华蜜蜂和西方蜜蜂 *Apis mellifera* 的病毒（张雪琦等，2020）。克什米尔蜜蜂病毒（*Kashmir bee virus*，KBV）是一种毒力较强的蜜蜂急性病毒，不仅在中华蜜蜂和西方蜜蜂中可进行水平和垂直传播，还会侵染熊蜂、胡蜂 *Vespidae* 等其他传粉昆虫（王帅等，2019）。此外，黑蜂王台病毒（*Black queen cell virus*，BQCV）侵染蜜蜂蜂王的幼虫和蛹后，会在短时间内死亡（梁利等，2019）这些病毒病最终会造成蜂群衰退。

除了蜂群病虫害，传粉蜂还要应对天敌的威胁，如蜜蜂的天敌包括蚂蚁、胡蜂、蜘蛛等，天敌不仅会捕食个体，还会侵袭蜂巢，造成蜂群毁灭的风险。

2.2.3　蜜源植物

授粉植物的性状特点，如植物的花色、花蜜、花粉、气味等，会影响传粉蜂的授粉效率。比如，花的颜色会给昆虫直观的视觉刺激，不同花色会吸引不同种类的传粉昆虫，如膜翅目的蜜蜂、熊

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

蜂就偏爱黄色、蓝色和白色，对红色不敏感（李绍文，2003）。花粉和花蜜营养成分不同，为传粉昆虫访花提供不同的氨基酸、蛋白质和脂类等营养物质，满足昆虫访花的目的和需求，其中，小型蜂类偏爱低蔗糖的花蜜，大型蜂类偏好于高蔗糖的花蜜（Harborne *et al.*，1993），油菜花粉对于意大利蜜蜂的繁育或蜂王浆生产来说，是一种优质营养来源（荀利杰等，2020）。花的结构，包括花瓣及柱头的形状、花倾斜的角度等也会影响昆虫的访花行为（Castellanos *et al.*，2010），如茄科植物的花较深，就适合使用熊蜂这一类喙较长的传粉昆虫。此外，植物的气味和次生挥发性物质是昆虫访花的嗅觉定向因素，有些植物次生代谢物质可以用于吸引或者排斥传粉昆虫（穆丹等，2010；Stevenson *et al.*，2017）。蜜源植物的性状和不同传粉蜂种的特点相适应，最终使得不同蜂种适合为不同作物授粉。

2.2.4 生境中的其他生物

传粉昆虫与众多其他生物共存于生态系统中，比如蜜源植物上的害虫和病原微生物，它们与传粉蜂也存在一定的间接互作。近年来，欧洲研究人员通过记录 1 470 个传粉昆虫在 4 种植物的 1 407 朵花（被植食性昆虫为害和未被为害的对照花）上的 4 049 个互作现象发现，植物受到植食性昆虫为害后，会对不同传粉昆虫产生吸引、排斥或中性的不同影响（Hoffmeister *et al.*，2016）。此外，瓦赫宁根大学的学者通过研究植食性害虫为害黑芥菜 *Brassica nigra* 后，发现传粉甲虫 *Meligethes aeneus* 会偏好被线虫 *Heterodera schachtii* 为害后的植物（Rusman *et al.*，2018）。随后，研究人员用 6 种不同取食方式的植食性昆虫处理黑芥菜，发现不同害虫为害后，对于传粉昆虫的传粉行为会造成积极的、消极的或者中性的不同影响。其中，相比未经植食性昆虫为害的植株，欧洲粉蝶 *Pieris brassicae* 更偏好经芜菁叶蜂 *Athalia rosae* 和甘蓝地种蝇 *Delia radicum* 幼虫为害的植株，却不喜欢经小菜蛾 *Plutella xylostella* 和甘蓝蚜 *Brevicoryne brassicae* 处理后的植株；而食蚜蝇 *Episyrphus balteatus* 则偏好菜缢管蚜 *Lipaphis erysimi* 和甘蓝地种蝇为害后的植株，不喜欢甘蓝蚜为害的植株，但是，小菜蛾和芜菁叶蜂为害与否却没有影响食蚜蝇的选择性（Rusman *et al.*，2019a）。芸薹属黑芥菜在被植食性昆虫取食或者传粉昆虫传粉后，通过改变花的挥发物，实现对植食性昆虫的防御和对欧洲粉蝶的吸引（Lucas-Barbosa *et al.*，2016）。此外，不同的植食性昆虫为害植物的叶片或者花等不同部位，也会对传粉昆虫的访花行为造成不同的影响（Rusman *et al.*，2019b）。因此，植食性昆虫为害寄主植物后，不仅可以影响植物的生长发育，还会调控植物与传粉昆虫的互作，影响传粉昆虫的访花传粉行为，而且，不同的植食性昆虫 - 寄主植物 - 传粉昆虫会发生不同的互作关系（Hoffmeister *et al.*，2016；Züst and Agrawal，2017；Rusman *et al.*，2019a）。此外，还有研究者发现，植物感染病毒病后，也会通过调节植物，实现对熊蜂的吸引，干预其访花行为（Groen *et al.*，2016）。

3 展望

随着现代农业技术的发展和绿色有机农业理念的深化，如何通过调动和发挥自然生态因子的调控作用，提升农业生产效率与农产品质量，已经是绿色农业产业革命的核心。传粉蜂因其高效传粉和环境监测等作用（Porrini *et al.*，2003；Finger *et al.*，2014；Van der Steen *et al.*，2015），在生态系统和农业生产中直接或者间接地发挥了重要的作用，创造了巨大的生态价值和经济价值，对维系植物多样性和提高农业生产力十分关键（Klein *et al.*，2007；Potts *et al.*，2016；Powney *et al.*，2019），目前在全球农业生产上受到越来越多的关注和应用。

本文重点讨论了影响蜂授粉效率的因素，其中拥有优良性状的蜂种是关键，随着现代分子生物学的发展，如基因编辑技术和多组学研究技术，人们将会在传粉蜂种质资源开发与改良、生理机制与高效生产、环境适合度提升与高效应用等方面开展研究并将会实现长足的进步。农药、重金属等非生物环境条件也是影响蜂授粉效果的重要因素。量化面源污染对传粉蜂在生物学、生理学等方面的直接或者间接影响，不仅可以帮助人们合理的使用传粉蜂，并且可以推动在更安全的层面开展栽培技术和水肥施用的管理。不过，随着有机农业和绿色农业等新型农业产业的发展，各类化肥农药等化学投入品的使用陆续得到有效控制，这也为安全使用传粉蜂创造了条件。但是，也正是因为传粉蜂对农药的敏感性，使得设施农业中农药的不合理和过量使用现象得到一定程度

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的控制，设施中的传粉蜂，也成为设施环境监测的指示生物。在今后的研究工作中，除了要筛选对传粉蜂友好的化学农药和植物源农药外，还要探究亚致死剂量对授粉蜂在生理、生殖和授粉性能等方面的影响，明确农药施用后对传粉蜂的安全期，为生产上的害虫综合防治技术体系内安全合理地配套应用传粉蜂提供依据。

近些年，我国传粉蜂产业和研究也在不断发展，从只关注蜂群养殖和蜂产品的生物学和开发应用，已经发展到利用组学、分子生物学、生态化学等技术手段，并在传粉蜂的生理、行为、生态等多角度开展研究。但是和欧美相比，我国在蜂种资源开发、人工饲养技术、授粉蜂的应用等方面都还存在很大的差距。目前国际上主要有荷兰科伯特（KOPPERT）、比利时碧奥特（Biobest）等国外公司提供系统的传粉蜂的技术和产品，近年来国内虽然也陆续出现一些授粉蜂的公司或机构，但是在高质量授粉蜂产品和配套应用技术方面还不成熟。在十四五及更长远的农业研究和发展道路上，在现有的各种技术手段基础上，可以在本土传粉蜂种的筛选与人工繁育、授粉条件与技术的优化、适宜不同作物授粉的蜂种选择及其应用的标准化等方面加大研究和应用力度，从而实现传粉蜂为人类粮食及蔬果供给和自然生态平衡更好地发挥其重要力量。

参考文献（References）

Adlerz WC. Honey bee visit numbers and watermelon pollination [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1966, 59 (1): 28 – 30.

An JD, Huang JX, Wu J. Effects of Bumblebee and on Yield and Fruit Quality of Greenhouse Tomato [C]. The Fifth International Conference on Biodiversity Conservation and Utilzation, 2005. [安建东, 黄家兴, 吴杰. 熊蜂授粉和蜜蜂授粉对设施番茄产量与品质的影响 [C]. 第五届生物多样性保护与利用高新科学技术国际研讨会, 2005]

Arce AN, Rodrigues AR, Yu J, *et al.* Foraging bumblebees acquire a preference for neonicotinoid-treated food with prolonged exposure [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285 (1885): 20180655.

Brittain C, Kremen C, Garber A, *et al.* Pollination and plant resources change the nutritional quality of almonds for human health [J]. *PLoS ONE*, 2014, 9 (2): e90082.

Bromenshenk JJ, Carlson SR, Simpson JC, *et al.* Pollution monitoring of Puget Sound with honey bees [J]. *Science*, 1985, 227: 632 – 634.

Calatayud – Vernich P, Calatayud F, Simó E, *et al.* A two – year monitoring of pesticide hazard in – hive: High honey bee mortality rates during insecticide poisoning episodes in apiaries located near agricultural settings [J]. *Chemosphere*, 2019, 232: 471 – 480.

Castellanos MC, Wilson P, Thomson JD. "Anti-bee" and "pro-bird" changes during the evolution of hummingbird pollination in penstemon flowers [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2010, 17 (4): 876 – 885.

Chan GY, Gao X, Zhu CZ, *et al.* Application of bumblebee pollination technology in hybrid seed production of broccoli [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61 (5): 107 – 109. [檀国印, 高旭, 朱长志, 等. 熊蜂授粉技术在西兰花杂交制种上的应用 [J]. 浙江农业科学, 2020, 61 (5): 107 – 109]

Chen WF, An JD, Dong J, *et al.* Flower – visiting behavior and pollination ecology of different bee species on greenhouse strawberry [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30 (2): 290 – 296. [陈文锋, 安建东, 董捷, 等. 不同蜂在温室草莓园的访花行为和传粉生态学比较 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (2): 290 – 296]

Costa G, Testolin R, Vizzotto G. Kiwifruit pollination: An unbiased estimate of wind and bee contribution [J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 1993, 21 (2): 189 – 195.

Dai P, Yan Z, Ma S, *et al.* The herbicide glyphosate negatively affects midgut bacterial communities and survival of honey bee during larvae reared in vitro [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66 (29): 7786 – 7793.

Di N, Hladun KR, Zhang K, *et al.* Laboratory bioassays on the impact of cadmium, copper and lead on the development and survival of honeybee (*Apis mellifera* L.) larvae and foragers [J]. *Chemosphere*, 2016, 152: 530 – 538.

Ding XM, Wei XM, Li M, *et al.* The development status of major facility horticulture countries [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2016, 36 (1): 22 – 32. [丁小明, 魏晓明, 李明, 等. 世界主要设施园艺国家发展现状 [J]. 农业工程技术, 2016, 36 (1): 22 – 32]

Du R, Du ZY. Problems and countermeasures of the development of facilities horticulture in China [J]. *Rural Technology*, 2020, 20: 23 – 25. [杜睿, 杜振永. 我国设施园艺发展存在的问题与对策 [J]. 乡村科技, 2020, 20: 23 – 25]

Eeraerts M, Smagghe G, Meeus I. Bumble bee abundance and richness improves honey bee pollination behaviour in sweet cherry [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2020, 43: 27 – 33.

Fang PP, Wang SP, Sun B, *et al.* Application technology of bumblebee pollination for greenhouse crops [J]. *Apiculture of China*, 2019, 70 (5): 41 – 43. [方萍萍, 汪舒萍, 孙博, 等. 温室作物熊蜂授粉配套应用技术 [J]. 中国蜂业, 2019, 70 (5): 41 – 43]

Finger D, Filho IK, Torres YR, *et al.* Propolis as an indicator of environmental contamination by metals [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 92: 259 – 265.

Free JB. Insect Pollination of Crops [M]. San Diego: Academic Press, 1993.

Gallai N, Salles JM, Settele J, *et al.* Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68 (3): 810 – 821.

Garibaldi LA, Carvalheiro LG, Vaissière BE, *et al.* Mutually beneficial

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms [J]. *Science*, 2016, 351 (6271): 388 – 391.

Goulson D, Nicholls E, Botias C, *et al.* Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides and lack of flowers [J]. *Science*, 2015, 347 (6229): 1255957.

Greenleaf SS, Kremen C. Wild bees enhance honey bees pollination of hybrid sunflower [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103 (37): 13890 – 13895.

Groen SC, Jiang S, Murphy AM, *et al.* Virus infection of plants alters pollinator preference: A payback for susceptible hosts [J]. *PLoS Pathogens*, 2016, 12 (8): e1005790.

Guo ZB, Li NG, Sun YS, *et al.* A study on the pollination of bumblebees to greenhouse white gourd [J]. *Journal of Bee*, 2003, 6: 3 – 4. [国占宝, 李乃光, 孙永深, 等. 熊蜂为温室冬瓜授粉的效果研究 [J]. 蜜蜂杂志, 2003, 6: 3 – 4]

Han SM, Lai K, Zhao YZ, *et al.* Flower – visiting behavior and pollination by honeybees in kiwifruit orchards [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (5): 139 – 146. [韩胜明, 赖康, 赵亚周, 等. 蜜蜂在猕猴桃园的访花行为和授粉效果评估 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (5): 139 – 146]

Han WS, Ren BC, Gao JL, *et al.* Potential synergistic effect of common fungicides on acetamiprid toxicity to Chinese honeybee (*Apis creana cerana*) [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12 (6): 273 – 280. [韩文素, 任承才, 高景林, 等. 常用杀菌剂对啶虫脒中华蜜蜂毒性潜在增效作用研究 [J]. 生态毒理学报, 2017, 12 (6): 273 – 280]

Harborne JB. Introduction to Ecological Biochemistry [M]. San Diego: Academic Press, 1993: 36 – 70.

Hladun KR, Kaftanoglu O, Parker DR, *et al.* Effects of selenium on development, survival, and accumulation in the honeybee (*Apis mellifera* L.) [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2013, 32 (11): 2584 – 2592.

Hladun KR, Parker DR, Trumble JT. Selenium accumulation in the floral tissues of two Brassicaceae species and its impact on floral traits and plant performance [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 74: 90 – 97.

Hladun KR, Parker DR, Trumble T. Cadmium, copper, and lead accumulation and bioconcentration in the vegetative and reproductive organs of *Raphanus sativus*: Implications for plant performance and pollination [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2015, 41 (4): 386 – 395.

Hoffmeister M, Wittköpper N, Junker RR. Herbivore-induced changes in flower scent and morphology affect the structure of flower-visitor networks but not plant reproduction [J]. *Oikos*, 2016, 125 (9): 1241 – 1249.

Holzschuh A, Dudenhöffer JH, Tscharntke T. Landscapes with wild bee habitats enhance pollination, fruit set and yield of sweet cherry [J]. *Biological Conservation*, 2012, 153: 101 – 107.

Hou Y, Hou J, Han HS, *et al.* Study on improving seed setting rate of the female parent in seed production of hybrid rape Ⅵ. The effect of bee release on seed setting rate and yield in seed production [J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2008, 36 (1): 22. [侯燕, 侯剑, 韩宏仕, 等. 杂交油菜制种中提高母本结实率的研究Ⅵ. 蜜蜂放养对制种结实率和产量的影响 [J]. 贵州农业科学, 2008, 36 (1): 22]

Jiang RT. A brief analysis of the causes and countermeasures of bee bumping into shed [J]. *Journal of Bee*, 2004, 1: 29. [姜仁涛. 浅析蜜蜂撞棚的原因及对策 [J]. 蜜蜂杂志, 2004, 1: 29]

Kapongo JP, Shipp L, Kevan P, *et al.* Co – vectoring of *Beauveria bassiana* and *Clonostachys rosea* by bumble bees (*Bombus impatiens*) for control of insect pests and suppression of grey mould in greenhouse tomato and sweet pepper [J]. *Biological Control*, 2008, 46 (3): 508 – 514.

Kessler S, Tiedeken EJ, Simcock KL, *et al.* Bees prefer foods containing neonicotinoid pesticides [J]. *Nature*, 2015, 521 (7550): 74 – 76.

Kim DR, Cho G, Jeon CW, *et al.* A mutualistic interaction between *Streptomyces* bacteria, strawberry plants and pollinating bees [J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 4802.

Lamsa J, Kuusela E, Tuomi J, *et al.* Low dose of neonicotinoid insecticide reduces foraging motivation of bumblebees [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285 (1883): 20180506.

Le Conte Y, Ellis M, Ritter W. *Varroa* mites and honey bee health: Can *Varroa* explain part of the colony losses [J]. *Apidologie*, 2010, 1 (3): 353 – 363.

Le Conte Y, Navajas, M. Climate change: Impact on honey bee populations and diseases [J]. *Revue Scientifique et Technique – Office International des Epizooties*, 2008, 27 (2): 499 – 510.

Li BJ, Zhu GR. Effects of dipping flower with growth regulators and artificial vibration pollination on fruit development and occurrence of grey mold in tomato [J]. *Acta Horticultures Science*, 1999, 26 (5): 337 – 338. [李宝聚, 朱国仁. 番茄喷蘸植物生长调节剂与灰霉病发生的关系 [J]. 园艺学报, 1999, 26 (5): 337 – 338]

Li JH. Analysis of the factors affecting honeybee pollination efficiency for agricultural crops [J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5 (9): 104 – 109. [李江红. 影响蜜蜂为农作物授粉效能的因素分析 [J]. 农学学报, 2015, 5 (9): 104 – 109]

Li JL, Peng WJ, Wu J, *et al.* Strawberry pollination by *Bombus lucorum* and *Apis mellifera* in greenhouses [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2006, 2: 342 – 348. [李继莲, 彭文君, 吴杰, 等. 明亮熊蜂和意大利蜜蜂为温室草莓的授粉行为比较观察 [J]. 昆虫学报, 2006, 2: 342 – 348]

Li SW. Ecology Biochemistry [M]. Beijing: Peking University Press, 2003. [李绍文. 生态生物化学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003]

Li WF, Han RC. Effects of the parasite *Varroa destructor* on honey bee, *Apis mellifera* L. development [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (5): 1093 – 1103. [李文峰, 韩日畴. 狄斯瓦螨寄生对西方蜜蜂发育的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (5): 1093 – 1103]

Liang L, Jin TD, Zhang L, *et al.* Advances in black queen cell virus of honey bee [J]. *Apiculture of China*, 2019, 70 (11): 67 – 70. [梁利, 金汤东, 张丽, 等. 蜜蜂黑蜂王台病毒病研究进展

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[J]. 中国蜂业, 2019, 70 (11): 67 – 70]

Liu SL, Shen RM, Zhu YQ. Temperature and humidity, plant growth and bee pollination [J]. *Apiculture of China*, 2013, 64: 27 – 29. [刘守礼, 申如明, 朱一卿. 温湿度与植物生长及蜜蜂授粉 [J]. 中国蜂业, 2013, 64: 27 – 29]

Lucas-Barbosa D, Sun P, Hakman A, *et al.* Visual and odour cues: Plant responses to pollination and herbivory affect the behaviour of flower visitors [J]. *Functional Ecology*, 2016, 30 (3): 431 – 441.

Luo CW, Chen Y, Zhang T. Pollination efficiency of the major pollinator of *Paeonia ostia* "Feng Dan" [J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2019, 43 (4): 148 – 154. [罗长维, 陈友, 张涛. 油用牡丹"凤丹"主要传粉昆虫的传粉行为比较 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 43 (4): 148 – 154]

Luo SD, Wang B, Chu ZQ, *et al.* Comparison of the pollination effects for pepper between different bees in greenhouse [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2015, 37 (2): 381 – 386. [罗术东, 王彪, 褚忠桥, 等. 不同蜂为设施辣椒授粉的授粉效果比较 [J]. 环境昆虫学报, 2015, 37 (2): 381 – 386]

Martin SJ, Brettell LE. Deformed wing virus in honeybees and other insects [J]. *Annual Review of Virology*, 2019, 6: 49 – 69.

Meindl GA, Bain DJ, Ashman TL. Variation in nickel accumulation in leaves, reproductive organs and floral rewards in two hyperaccumulating Brassicaceae species [J]. *Plant and Soil*, 2014b, 383 (1): 349 – 356.

Meindl GA, Bain DJ, Tia – Lynn A. Nickel accumulation in leaves, floral organs and rewards varies by serpentine soil affinity [J]. *AoB PLANTS*, 2014a, 6: plu036.

Moffat C, Pacheco JG, Sharp S, *et al.* Chronic exposure to neonicotinoids increases neuronal vulnerability to mitochondrial dysfunction in the bumblebee (*Bombus terrestris*) [J]. *The FASEB Journal*, 2015, 29 (5): 2112 – 2119.

Motzke I, Tscharntke T, Wanger TC, *et al.* Pollination mitigates cucumber yield gaps more than pesticide and fertilizer use in tropical smallholder gardens [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52 (1): 261 – 269.

Mu D, Fu JY, Liu YA, *et al.* Advances in metabolic regulation mechanism of herbivore – induced plant volatiles [J]. *Acta Ecology Scienca*, 2010, 30 (15): 4221 – 4233. [穆丹, 付建玉, 刘守安, 等. 虫害诱导的植物挥发物代谢调控机制研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 30 (15): 4221 – 4233]

Parker FD. Sunflower pollination: Abundance, diversity and seasonality of bees and their effect on seed yields [J]. *Journal of Apicultural Research*, 1981, 20: 49 – 61.

Polykretis P, Delfino G, Petrocelli I, *et al.* Evidence of immunocompetence reduction induced by cadmium exposure in honey bees (*Apis mellifera*) [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 826 – 834.

Porrini C, Sabatini AG, Girotti S, *et al.* Honey bees and bee products as monitors of the environmental contamination [J]. *Apiacta*, 2003, 38: 63 – 70.

Potts SG, Imperatriz – Fonseca V, Ngo HT, *et al.* Safeguarding pollinators and their values to human well – being [J]. *Nature*, 2016, 540 (7632): 220 – 229.

Powney GD, Carvell C, Edwards M, *et al.* Widespread losses of pollinating insects in Britain [J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 1018 – 1024.

Pozo MI, Vendeville J, Kay C, *et al.* Entomovectoring technology in kiwifruit pollination [J]. *Acta Horticulturae*, 2018, 1218: 381 – 390.

Prins CN, Hantzis LJ, Quinn CF, *et al.* Effects of selenium accumulation on reproductive functions in *Brassica juncea* and *Stanleya pinnata* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62 (15): 5633 – 5640.

Raimets R, Karise R, Mänd M, *et al.* Synergistic interactions between a variety of insecticides and an ergosterol biosynthesis inhibitor fungicide in dietary exposures of bumble bees (*Bombus terrestris*) [J]. *Pest Management Science*, 2018, 74 (3): 541 – 546.

Rosenkranz P, Aumeier P, Ziegelmann B. Biology and control of *Varroa destructor* [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2010, 103 (Suppl. 1): S96 – S119.

Rothmanab JA, Russellb KA, Legerb L, *et al.* The direct and indirect effects of environmental toxicants on the health of bumble bees and their microbiomes [J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2020, 287 (1937): 20200980.

Rundlof M, Andersson GK, Bommarco R, *et al.* Seed coating with a neonicotinoid insecticide negatively affects wild bees [J]. *Nature*, 2015, 521 (7550): 77 – 80.

Rusman Q, Karssemeijer PN, Lucas – Barbosa D, *et al.* Settling on leaves or flowers: Herbivore feeding site determines the outcome of indirect interactions between herbivores and pollinators [J]. *Oecologia*, 2019b, 191 (4): 887 – 896.

Rusman Q, Lucas-Barbosa D, Poelman EH. Dealing with mutualists and antagonists: Specificity of plant-mediated interactions between herbivores and flower visitors, and consequences for plant fitness [J]. *Functional Ecology*, 2018, 32 (4): 1022 – 1035.

Rusman Q, Poelman EH, Nowrin F, *et al.* Floral plasticity: Herbivore-species-specific-induced changes in flower traits with contrasting effects on pollinator visitation [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019a, 42 (6): 1882 – 1896.

Sáez A, Negri P, Viel M, *et al.* Pollination efficiency of artificial and bee pollination practices in kiwifruit [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 1017 – 1021.

Schweiger O, Biesmeijer JC, Bommarco R, *et al.* Multiple stressors on biotic interactions: How climate change and alien species interact to affect pollination [J]. *Biological Reviews*, 2010, 85 (4): 777 – 795.

Silva CA, Godoy WA, Jacob CR, *et al.* Bee pollination highly improves oil quality in sunflower [J]. *Sociobiology*, 2018, 65 (4): 583 – 590.

Sivakoff FS, Gardiner MM. Soil lead contamination decreases bee visit duration at sunflowers [J]. *Urban Ecosystems*, 2017, 20 (6): 1221 – 1228.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Siviter H, Brown MJ, Leadbeater E. Sulfoxaflor exposure reduces bumblebee reproductive success [J]. *Nature*, 2018, 61 (7721): 109 – 112.

Stern RA, Goldway M, Zisovich AH, *et al.* Sequential introduction of honeybee colonies increases cross – pollination, fruit-set and yield of 'Spadona' pear (*Pyrus communis* L.) [J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2004, 79 (4): 652 – 658.

Stevenson PC, Nicolson SW, Wright GA. Plant secondary metabolites in nectar: Impacts on pollinators and ecological functions [J]. *Functional Ecology*, 2017, 31 (1): 65 – 75.

Su W, Liang C, Ding G, *et al.* First record of the Velvet ant *Mutilla europaea* (Hymenoptera: Mutillidae) parasitizing the bumblebee *Bombus breviceps* (Hymenoptera: Apidae) [J]. *Insects*, 2019, 10 (4): 104.

Su YQ, Liu DS, Lin ZH, *et al.* Application technology of bee – assisted pollination in watermelon hybrid seed production [J]. *China Vegetable*, 2013, 5: 48 – 49. [苏永全, 刘东顺, 蔺正和, 等. 西瓜杂交制种蜜蜂辅助授粉应用技术 [J]. 中国蔬菜, 2013, 5: 48 – 49]

Taylor MD. Accumulation of cadmium derived from fertilizers in New Zealand soil [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 208: 123 – 126.

Van der Steen JJM, de Kraker J, Grotenhuis T. Assessment of the potential of honeybees (*Apis mellifera* L.) in biomonitoring of air pollution by cadmium, lead and vanadium [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2015, 6: 96 – 102.

Velthuis H, van Doorn A. A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination [J]. *Apidologie*, 2006, 37: 421 – 451.

Wang CJ, Zheng MQ, Qiu LH, *et al.* Safety Evaluation of Herbicides to Bees [C]. Proceedings of the International Conference on Pesticide and Environmental Safety, 2005, 4. [王成菊, 郑明奇, 邱立红, 等. 除草剂对蜜蜂的安全性评价 [C]. 农药与环境安全国际会议论文集, 2005, 4]

Wang LG, Huang K, Xu MG, *et al.* Study on yield increasing and quality improving of honeybee pollination for rape [J]. *Apiculture of China*, 2011, 62 (10): 45 – 47. [汪礼国, 黄康, 徐明贵, 等. 蜜蜂对油菜授粉增产提质效果研究 [J]. 中国蜂业, 2011, 62 (10): 45 – 47]

Wang Q, Dai PL, Wu YY, *et al.* Analysis on the diagnosis and control status of honeybee diseases and pests in China [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15: 97 – 101. [王强, 代平礼, 吴艳艳, 等. 我国蜜蜂病虫害诊断, 防治现状及对策分析 [J]. 中国农业科技导报, 2013, 15: 97 – 101]

Wang S, Lin ZG, Chen GW, *et al.* Advances in kashmir bee virus (KBV) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2019, 62 (10): 1228 – 1238. [王帅, 蔺哲广, 陈功文, 等. 克什米尔蜜蜂病毒 (KBV) 研究进展 [J]. 昆虫学报, 2019, 62 (10): 1228 – 1238]

Wang S, Xie LX, Chen H, *et al.* Toxicity and risk assessment of eight neonicotinoid insecticides to workers of *Bombus terrestris* (Hymenoptera: Apoidea) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 62 (1): 29 – 35. [王烁, 谢丽霞, 陈浩, 等. 八种新烟碱类杀虫剂对地熊蜂工蜂的毒性及风险评估 [J]. 昆虫学报, 2020, 62 (1): 29 – 35]

Wang XH. Small cherry big industry: Current status and future of my country's cherry industry – interview with Zhang Kaichun, deputy director of the Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, and president of the Cherry Branch of the Chinese Horticultural Society [J]. *China Rural Science & Technology*, 2018, 2: 70 – 73. [王雯慧. 小樱桃 大产业: 我国樱桃产业的现状与未来——专访北京市农林科学院林业果树研究所副所长、中国园艺学会樱桃分会会长张开春 [J]. 中国农村科技, 2018, 2: 70 – 73]

Wang YJ, Gao JL, Han WS, *et al.* Acute toxicity and hazard assessment of 10 fungicides on *Apis cerana cerana* [J]. *Natural Enemies of Insects*, 2017, 39 (1): 126 – 133. [王雅珺, 高景林, 韩文素, 等. 10 种杀菌剂对中华蜜蜂的急性毒性测定及风险评估 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (1): 126 – 133]

Woodcock BA, Bullock JM, Shore RF, *et al.* Country – specific effects of neonicotinoid pesticides on honey bees and wild bees [J]. *Science*, 2017, 356 (6345): 1393 – 1395.

Xiao YL, Tang WY, Liu CH, *et al.* Analysis of the pollinating services provided by *Osmia cornifrous* (Rodoszkouski) and *Apis mellifera ligustica* Spin in apple and cherry orchards [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (6): 1235 – 1242. [肖云丽, 唐文颖, 刘存辉, 等. 壁蜂及蜜蜂授粉对苹果和大樱桃授粉服务功能分析 [J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (6): 1235 – 1242]

Xing CZ, Guo LP, Miao CD, *et al.* Study on effect of producing cotton hybrids by bees pollination [J]. *Cotton Science*, 2005, 17 (4): 207 – 210. [邢朝柱, 郭立平, 苗成朵, 等. 棉花蜜蜂传粉杂交制种效果研究 [J]. 棉花学报, 2005, 17 (4): 207 – 210]

Xu XL, Wang FH, Geng JH. The key technology of applying bees to pollinate crops without hitting the shed [J]. *Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary*, 2009, 8 (327): 88. [徐希莲, 王凤贺, 耿金虎. 应用蜜蜂为作物授粉不撞棚的关键技术 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2009, 8 (327): 88]

Xun LJ, Huang XQ, Li QY, *et al.* Effects of different bee pollens on expression of major royal jelly protein genes and yield, quality and composition of royal jelly of *Apis mellifera* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32 (2): 856 – 869. [荀利杰, 黄新球, 李琼艳, 等. 不同蜂花粉对西方蜜蜂蜂王浆主蛋白基因表达及蜂王浆产量、质量和组成的影响 [J]. 动物营养学报, 2020, 32 (2): 856 – 869]

Yang G. The U. S. environmental protection agency approved the registration of the first biopesticide using bees as a transmission carrier [J]. *Pesticide Market Information*, 2019, 657 (18): 56. [杨光. 美国环保署批准首个以蜜蜂为传播载体生物农药活性成分的登记 [J]. 农药市场信息, 2019, 657 (18): 56]

Yang HS, Li JT, Wang XX, *et al.* Influence of utilization bee pollination on output of Chinese cabbage production [J]. *Seed Science & Technology*, 2002, 20 (4): 223 – 224. [杨恒山, 李建涛, 王雪

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

侠，等．利用蜜蜂传粉对大白菜制种产量质量的影响［J］．种子科技，2002，20（4）：223－224］

You C，Chen DJ，Wu WL. Effects of different pollination methods on yield and quality of greenhouse tomato［J］. *Journal of Changjiang Vegetables*，2020，518（24）：60－62.［尤春，陈大军，吴文丽．不同授粉方式对设施番茄产量，品质及效益的影响［J］．长江蔬菜，2020，518（24）：60－62］

You Y，Ying BH，Lai LF，*et al*. The acute toxicity and risk assessment of four multi－combination nicosulfuron to *Apis mellifera* and *Trichogramma ostriniae*［J］. *Asian Journal of Ecotoxicology*，2018，13（6）：298－306.［游泳，应碧华，赖露芳，等．4 种烟嘧磺隆多元复配除草剂对意大利蜜蜂和玉米螟赤眼蜂的急性毒性及初级风险评估［J］．生态毒理学报，2018，13（6）：298－306］

Zhang XQ，Sun LP，Zhao DX，*et al*. Progress in research on pathogenic factors of the *Chinese sacbrood virus* and the potential of Chinese herbal medicine to control this disease［J］. *Chinese Journal of Applied Entomology*，2020，57（4）：806－813.［张雪琦，孙丽萍，赵冬香，等．中华蜜蜂囊状幼虫病发病及防治研究进展［J］．应用昆虫学报，2020，57（4）：806－813］

Zhang YL. *Apis cerana cerana* pollinates strawberry［J］. *Apiculture of China*，2013，64（1）：14.［张亚利．中华蜜蜂为草莓授粉［J］．中国蜂业，2013，64（1）：14］

Zhao BG，Xu GH，Xiao ZY，*et al*. First trials to pollinate *Camellia oleifera* by using *Bombus terrestris*［J］. *Journal of Nanjing Forestry University*（Natural Science Edition），2018，42（1）：175－180.［赵博光，徐光辉，肖智勇，等．油茶熊蜂授粉试验初报［J］．南京林业大学学报（自然科学版），2018，42（1）：175－180］

Zheng XK，Lu AH，Gao X，*et al*. Contamination of heavy metals in soil present situation and method［J］. *Soil and Environmental Sciences*，2002，11：79－84.［郑喜珅，鲁安怀，高翔，等．土壤中重金属污染现状与防治方法［J］．土壤与环境，2002，11：79－84］

Zheng ZN，Wu XL. Research on bumblebee pollination in greenhouse tomato［J］. *Vegetables*，2019，339（3）：24－27.［郑子南，吴晓磊．设施番茄熊蜂授粉试验研究［J］．蔬菜，2019，339（3）：24－27］

Zhou H，Zhai YF，Hu ZZ，*et al*. Evaluation the susceptibility of *Bombus terrestris* to six fungicides uses in greenhouse［J］. *Hebei Agricultural Sciences*，2016，20（3）：35－37.［周浩，翟一凡，胡泽章，等．地熊蜂对设施农业 6 种常用杀菌剂的敏感性研究［J］．河北农业科学，2016，20（3）：35－37］

Züst T，Agrawal AA. Trade－offs between plant growth and defense against insect herbivory：An emerging mechanistic synthesis［J］. *Annual Review of Plant Biology*，2017，68：513－534.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net