



•综述•

环境变化对中国野生蜜蜂多样性的影响

刘秀薇 Douglas Chesters 武春生 周青松 朱朝东*

(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)

摘要: 蜜蜂尤其是野生蜜蜂对维持生态系统功能、保证粮食安全等方面具有重要的作用。近年来, 野生蜜蜂的栖息地由于天然林减少, 而现营造的又多为纯林, 以及大面积种植单一经济林而遭到了严重破坏和片断化。已有研究表明纯林、油茶(*Camellia oleifera*)和橡胶树(*Hevea brasiliensis*)经济林中的野生蜜蜂多样性较低。现代农业中新烟碱类杀虫剂、除草剂的大规模使用, 会对蜜蜂个体发育和行为产生不利影响。城市化进程潜在影响了蜜蜂的群落, 如郊区的蜜蜂平均物种丰富度要明显高于中心商业区; 废水、废气和粉尘对蜜蜂的觅食、生长发育等都具有不利影响; CO₂等温室气体导致的气候变暖影响了传粉蜜蜂与植物之间的互利共生关系, 造成时间或功能上的不匹配。综上所述, 我国的环境变化可能已导致中国野生传粉蜜蜂多样性的下降和种群的衰退。我国虽是传粉蜜蜂种质资源大国, 但缺乏种类和分布本底以及长期而有效的监测数据, 缺乏对蜜蜂多样性和种群下降机制的研究。因此亟待开展传粉蜜蜂调查、实施长期监测项目, 为之建立研究网络。并通过积累丰富的相关数据, 开展风险预测和评估, 用于管理和缓解传粉蜜蜂下降所带来的经济及非经济影响。

关键词: 生境; 城市化; 气候变化; 环境污染; 传粉蜜蜂

A horizon scan of the impacts of environmental change on wild bees in China

X iuwei Liu, Douglas Chesters, Chunsheng Wu, Qingsong Zhou, Chaodong Zhu*

Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

Abstract: Wild pollinator bees play an important role in ecosystem function and food security. In recent years, natural forests have been lost, while afforestation programs are primarily monoculture plantation, whether commercial or restorative. The net effect for bees has been fragmentation and sometime wholesale loss of habitats. For instance, diversity of wild bees in pure forest, *Camellia oleifera* and rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation was found to be unexpectedly low. The rampant use of neonicotinoid pesticides and herbicide is known to negatively impact development and behavior of bees. Urbanization has dramatically impacted bee communities, with significant changes in species richness between suburban and central business areas. These are likely tied to the effect of effluent, exhaust gas and dust on foraging, growth and development. Climate change from greenhouse gas emissions can disrupt the mutualistic relationship between pollinating bees and plants via rapid phenological shifts. The above environmental changes occurring in China are likely cause wide declines in diversity and decreases in populations. Although China has rich natural heritage for bees, there is a lack of long term monitoring programs for species of pollinator bees and a dearth of data on distributions of bee species. As a result, the drivers of bee community composition and population decline are poorly understood. We emphasize the need to prioritize surveys of pollinating bees, continue ongoing monitoring programs and build wider research networks for the study of wild pollinator bees. These steps will ensure that sufficient data can accumulate for developing a prediction and risk assessment framework to help manage the declines in pollinating bee populations and mitigate the attendant economic and non-economic impacts.

Key words: habitat; urbanization; climate change; environmental pollution; pollinating bees

收稿日期: 2018-03-12; 接受日期: 2018-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(31772495)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhucd@ioz.ac.cn

以蜜蜂类为代表的传粉昆虫是全球生物多样性的的重要组成部分,对维持陆地生态系统的平衡具有重要的作用和意义,同时也为人类带来直接和间接的利益。传粉昆虫不仅为农田作物提供传粉服务,更为野生植物、整个生态系统和人类提供了重要的生态服务。其传粉活动不仅是保障生物多样性和生态环境多样性的重要因素之一,更是全球粮食安全以及应对气候变化的保障。世界上87.5%的被子植物、超过70%的作物,以及超过35%的粮食生产取决于以传粉昆虫为主的动物授粉,若传粉昆虫丰度和多样性减少,将直接降低对野生植物的授粉服务(Aguilar et al, 2006; Ollerton et al, 2011; Kleijn et al, 2015)。当前由于生境的破坏和片断化、现代农业集约化的管理、城市化进程加快和全球气候变化等多种因素的影响,全球传粉昆虫的多样性呈现下降趋势,传粉昆虫所提供的传粉服务也在减少,家养传粉者、野生传粉者以及许多依赖它们传粉服务的植物同时也出现下降的趋势(Potts et al, 2010)。蜜蜂类是传粉昆虫中最主要的类群,全球107种重要作物中有90%依赖其传粉(Potts et al, 2016)。近年来,中国在农林业、城市建设、经济发展等方面均取得了令人瞩目的成绩,但随之而来的各种环境变化却不容忽视。本文结合国家权威网站公布的数据,对中国传粉蜜蜂多样性的现状进行了介绍。

1 栖息地的破坏

自然生境的片断化和丧失是许多蜜蜂种类的主要威胁(Dorchin et al, 2013)。森林砍伐造成天然林的大面积丧失,使传粉蜜蜂丧失了大量可生活繁衍的生存环境。尽管国家出台了一系列保护及管理措施,但营造林地多为纯林或少量树种混交林,无法为野生传粉蜜蜂提供良好的生境。而大面积单一经济林的种植,使蜜蜂面临严重的生境片断化,可觅食、栖息、筑巢环境改变和减少,从而使蜜蜂多样性面临下降的威胁。

1.1 森林砍伐造成生境丧失和破碎化

2000年,中国大陆森林或林地面积为176.5万 km^2 ,到了2010年,森林和林地减少了480.203 km^2 ,仅森林就损失127.473 km^2 (Ren et al, 2015)。随着天然林的减少,部分生态系统功能退化,生物多样性呈下降趋势。中华人民共和国生态环境部(原中华人民共和国环境保护部)2010年发布的中国环境状况

公报显示,约有15–20%的中国野生高等植物处于濒危状态(<http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526562650021158.pdf/>),其中濒危裸子植物和兰科植物等所占比例高达40%以上。兰花的传粉系统具有很强的专一性,兰科等植物的濒危预示着其专性传粉的蜜蜂可能由于缺乏蜜源植物而面临濒危。在对热带森林破碎化的研究中发现,虽然森林碎片大小、形状、隔离和景观环境这一系列森林变量对蜜蜂的多样性和丰富度没有影响,但蜜蜂的群落组成却发生了巨大的变化,尽管蜜蜂整体表现出一定程度上对土地利用变化的弹性,但也有类群特异性反应,因此天然林保护无疑具有重要的价值(Berry et al, 2007)。

自1999年开始,国家就已开始采取一系列森林保护和管理措施,如天然林资源保护、退耕还林(草)等,但这些工程营造的多为纯林和少量树种组成的混交林。纯林中蜜蜂多样性低,因为大面积造林还达不到接近天然林的生物多样性水平(Hua et al, 2016)。后来开始推行混交林,仅2015年,全国就新造混交林114.58万ha,混交林种植比重增加(<http://www.forestry.gov.cn/main/62/content-957369.html>)。森林干扰驱动生境异质性的增加,可获得传粉昆虫的积极响应(Rodríguez & Kouki, 2017),而森林条件的改变对缓解传粉昆虫的下降有所帮助,其中稀疏的森林与灌木相结合的模式可为蜜蜂提供良好的生境(Hanula et al, 2015)。营造混交林在恢复森林生态系统服务功能的同时,对传粉昆虫多样性的保护也能起到一定的作用。

1.2 单一经济林的种植

单一经济林的种植导致可供传粉昆虫栖息、觅食、筑巢的环境越来越少。以油茶(*Camellia oleifera*)和橡胶树(*Hevea brasiliensis*)经济林为例:(1)目前油茶在我国江西、安徽、广西等18个省(区)均有栽培,且栽培面积不断扩大。野生蜜蜂作为油茶的有效传粉者(且绝大多数种类都是独栖蜜蜂),一般栖息在地表以下,对栖息地环境要求较高。大量工业污染源和农药的使用,以及林内土壤的紧实度等因素影响了这类传粉昆虫的筑巢和繁殖(夏剑萍等, 2010; 周士锋和韩春叶, 2011),进而导致油茶林内野生蜜蜂种群数量和多样性的降低。(2)西双版纳地区自20世纪50年代末期开始大规模种植橡胶,至2012年全州种植面积已达到28.95万ha,同期天然林的覆盖

率下降了40–50%，并且热带雨林被分割成“孤岛”式的片断化热带雨林(周宗等, 2006; 张佳琦和薛达元, 2013)。橡胶林下植被的物种多样性随着橡胶树树龄的增长呈降低趋势(周会平等, 2012), 因此其生物多样性远远不能与热带雨林相比, 也缺乏野生动植物适宜的生存环境, 导致传粉昆虫种群及物种多样性下降。调查显示, 橡胶林茶园中的蜜蜂总物种数只有热带雨林生境中的20% (杨龙龙和吴燕如, 1998), 橡胶成熟林内蜜蜂多样性显著低于天然林和林缘地区(Liu et al, 2017)。

2 农药施用对蜜蜂多样性的影响

随着现代农业的不断发展, 规模化生产和集约化管理逐渐形成体系, 该体系的建立破坏了传粉昆虫原有的生态环境。我国的农业集约化发展主要有作物良种的推广和使用、化肥和农药的大量使用以及高投入的机械、灌溉等(向晶和唐亚, 2005; 卓东, 2017)。据统计, 2013–2016年间, 我国农作物总播种面积均以平均每年80万ha的速度在增长。虽然农药的使用量在2012–2015年间出现下降的趋势, 但是化学农药原药产量和农药进口量呈现持续增长的趋势。尤其是广谱性杀虫剂、除草剂的使用等是野生蜜蜂种群数量减少的主要原因之一。

传粉蜜蜂对化学性农药具有极高的敏感性(余林生等, 2009)。化学药剂经植物吸收后进入植物内部, 传粉蜜蜂通过取食花粉或花蜜引起中毒。新烟碱类是目前世界上使用较为广泛的杀虫剂之一, 也是导致蜜蜂种群下降的最主要因素之一。该类杀虫剂会对昆虫免疫系统产生不良影响(Di Prisco et al, 2013), 与致病菌相互作用, 使蜜蜂死亡率升高(Doublet et al, 2015); 除影响蜜蜂个体发育外, 新烟碱类杀虫剂中的吡虫啉还能对蜜蜂觅食、避敌、学习等行为产生影响(Tan et al, 2014, 2015)。此外, 除草剂导致的田边植被、野生蜜源植物的缺少也影响到野生蜜蜂的筑巢、食源, 最终导致其种群数量下降(徐环李等, 2009)。

3 城市化

城市化进程的加快影响了传粉昆虫的生境, 进而潜在影响到蜜蜂的群落。近年来, 我国城区面积和城市建设用地面积逐年扩大, 而城市的发展已经导致世界许多地区的土著植物种群受到生境丧失

的威胁, 继而影响了传粉昆虫的种群数量和群落结构。Williams和Winfree (2013)在美国费城附近东北部滨海森林的生态区域进行研究时发现: 传粉昆虫的丰度和多样性并没有因为景观尺度的栖息地丧失而减少, 它们更多地受到局部区域生境特性的影响。如随着城市的发展, 人为制造的生境(植物园、公园、景点)也为一些蜜蜂提供了一定的蜜源植物和栖息地。Sing等(2016)的研究表明, 虽然郊区与植物园, 或植物园与中央商业区的蜜蜂丰富度并没有明显差别, 但是郊区的蜜蜂平均物种丰富度要明显高于中心商业区。农田和城市的蜜蜂丰度差别不大, 但是城市的物种丰富度更高, 群落分布也更均匀, 但传粉者–植物关系网络的专一性水平较低(Baldock et al, 2015)。

4 环境污染对野生蜜蜂多样性的影响

环境污染在降低环境自净能力的同时, 也降低了生态系统的功能, 而蜜蜂对这些变化十分敏感(余林生, 2009)。虽然自2016年开始我国的废水、废物、废气的排放量有所下降, 但废水、二氧化硫、氮氧化物以及烟(粉)尘排放总量在2012–2015年间呈逐年增加的态势, 仅2015年度废水排放总量就达到735.32亿吨。这些污染源破坏了蜜源植物生长的土壤环境, 影响了蜜源植物的数量和质量, 并对蜜蜂的健康、行为均造成了不良影响, 如空气污染使蜜蜂更难找到食物, CO₂升高会降低北美洲蜜蜂一种主要食物来源的花粉中的蛋白质含量(Fuentes et al 2016; Ziska et al, 2016)。

城市和工业走廊的空气污染水平已经对昆虫觅食效率和植物–昆虫的相互作用产生了有害影响(Fuentes et al, 2016)。工业区内的有害气体和粉尘会影响蜜蜂的生长发育、引起中毒死亡, 从而导致蜜蜂种群的下降; 此外城市以及工业污水是引起蜂群产生爬蜂病的主要因素之一(余林生, 2009); 也有研究显示重金属污染与野生蜜蜂种群之间具有显著的负相关关系(Moron et al, 2012)。近年来, 全球范围内人工照明的范围和时长的迅速增长也被认为能够对陆地生态系统产生新的威胁。夜间的人工照明会引起传粉昆虫的趋光性从而扰乱夜间传粉网络的运行, 相对于无照明区, 人工照明区域中传粉者夜间对植物的访问频次降低了62% (Knop et al, 2017)。

5 气候变化影响蜜蜂与植物之间的相互作用关系

二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等温室气体是导致全球气候变暖的主要原因之一。有研究表明, 21世纪的剩余时间里, 全球变暖的预测值可能高于IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会, Intergovernmental Panel on Climate Change)之前预计的结果, 即全球变暖趋势可能更加严重(Brown & Caldeira, 2017)。气候变暖会对植物和传粉昆虫的物候、丰富度和大尺度分布产生影响, 有研究表明可能会使具有互利共生关系的植物和传粉者发生时间上的不匹配(Hegland et al, 2009)。在欧洲和北美洲对熊蜂物种监测约110年的数据表明: 在这段漫长的时间里, 随着气候变暖, 熊蜂在南方的活动范围逐渐萎缩并向北移动; 南方种类的栖息地向更高海拔地区转移(Kerr et al, 2015)。熊蜂与其共生的蜜源植物出现功能上的不匹配, 扰乱了原本两者之间的互利关系(Miller-Struttman et al, 2015)。此外, 在植物与传粉昆虫互作网络中, 非禾本科植物与蜜蜂物候学的转变将会导致时间上的不匹配, 并引起非随机物种灭绝(Burkle et al, 2013)。Robbirt等(2014)发现温度升高后, 独栖蜂*Andrena nigroaenea*开始飞行的时间比具有欺骗性花朵的兰花*Ophrys sphegodes*的开花日期提前, 雄性蜜蜂比雌性蜜蜂略早出现, 雌性吸引了雄性的交配注意力, 使其远离欺骗性花朵。

6 对策与建议

综上所述, 多年来的森林砍伐、单一经济林种植、现代集约化农业管理、城市化进程、环境污染、气候变化等问题, 对传粉蜜蜂的食源、水源、栖息地、繁殖地均有较大的影响。研究表明, 2000–2010年, 在粮食生产、碳固定、土壤保持等生态系统服务整体好转的情况下, 能为蜜蜂生物多样性所提供的栖息地却呈下降趋势(Ouyang et al, 2016)。

由于在保证粮食安全、促进食物多样化、保护物种多样性、维护生态系统功能等方面的巨大贡献, 传粉蜜蜂尤其是野生传粉蜜蜂及其相关研究已经开始引起全世界的重视。当传粉被视为一种生态功能和生态系统服务时, 对部分区域甚至全球尺度传粉昆虫多样性的调查、监测, 掌握其现状及丧失情

况, 就显得尤为紧迫(Ollerton, 2017)。有多重潜在因素影响蜜蜂的多样性, 如现代农业、环境改变以及蜜蜂自身种群等(Potts et al, 2010; Nicholls & Altieri, 2013; van der Valk, 2013)。目前欧美发达国家和地区, 如美国(国家传粉昆虫健康战略、传粉者研究行动计划、友好传粉者联邦土地最佳管理操作规范)、英国(英国国家保护蜜蜂免受害虫和疾病侵扰指南、英国国家传粉者战略: 蜜蜂和其他传粉者、建立蜜蜂数据库)、欧盟(欧盟蜜蜂健康与传粉科学工作组)都出台了相应的国家(地区)级战略和行动计划, 建立了相关监测系统, 对传粉昆虫进行监测, 积累了丰富的数据。而我国传粉蜜蜂的研究仍比较薄弱, 尤其缺乏野生传粉蜜蜂本底情况和长期而有效的监测数据。建议尽快完善传粉蜜蜂监测网络建设, 对传粉蜜蜂的多样性、蜜源植物多样性、生境及其相关数据进行系统而长期的收集; 开展蜜蜂种群下降可能引起的经济学和非经济学的风险预测和评估工作, 为后续研究工作和国家相关政策的制定积累基础数据。

参考文献

- Aguilar R, Ashworth L, Galetto L, Aizen MA (2006) Plant reproductive susceptibility to habitat fragmentation: Review and synthesis through a meta-analysis. *Ecology Letters*, 9, 968–980.
- Baldock KC, Goddard MA, Hicks DM, Kunin WE, Mitschunas N, Osgathorpe LM, Potts SG, Robertson KM, Scott AV, Stone GN, Vaughan IP, Memmott J (2015) Where is the UK's pollinator biodiversity? The importance of urban areas for flower-visiting insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, 20142849.
- Berry JB, Darly GC, Shih TM, Oviedo F, Durán (2007) The effects of forest fragmentation on bee communities in tropical countryside. *Journal of Applied Ecology*, 45, 773–783.
- Brown PT, Caldeira K (2017) Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget. *Nature*, 552, 45–50.
- Burkle LA, Marlin JC, Knight TM (2013) Plant-pollinator interactions over 120 years: Loss of species, co-occurrence, and function. *Science*, 339, 1611–1615.
- Di Prisco G, Cavaliere V, Annoscia D, Varricchio P, Caprio E, Nazzi F, Gargiulo G, Pennacchio F (2013) Neonicotinoid clothianidin adversely affects insect immunity and promotes replication of a viral pathogen in honey bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110, 18466–18471.
- Dorchin A, Filin I, Lzhaki I, Dafni A (2013) Movement of

patters of solitary bees in a threatened fragmented habitat. *Apidologie*, 44, 90–99.

- Doublet V, Labarussias M, de Miranda JR, Moritz RFA, Paxton RJ (2015) Bees under stress: Sublethal doses of a neonicotinoid pesticide and pathogens interact to elevate honey bee mortality across the life cycle. *Environmental Microbiology*, 17, 969–983.
- Fuentes JD, Chamecki M, Roulston T, Chen BC, Pratt KR (2016) Air pollutants degrade floral scents and increase insect foraging times. *Atmospheric Environment*, 141, 361–374.
- Hanula JL, Horn S, O'Brien JJ (2015) Have changing forests conditions contributed to pollinator decline in the southeastern United States? *Forest Ecology and Management*, 348, 142–152.
- Hegland SJ, Nielsen A, Lázaro A, Bjerknes AL, Totland Ø (2009) How does climate warming affect plant–pollinator interactions? *Ecology Letters*, 12, 184–195.
- Hua FY, Wang XY, Zheng XL, Fisher B, Wang L, Zhu J, Tang Y, Yu DW, Wilcove DS (2016) Opportunities for biodiversity gains under the world's largest reforestation programme. *Nature Communications*, 7, 12717.
- Kerr JT, Pindar A, Galpern P, Packer L, Potts SG, Roberts SM, Rasmont P, Schweiger O, Colla SR, Richardson LL, Wagner DL, Gall LF, Sikes DS, Pantoja A (2015) Climate change impacts on bumblebees converge across continents. *Science*, 349, 177–180.
- Kleijn D, Winfree R, Bartomeus I, Carvalheiro LG, Henry M, Isaacs R, Klein AM, Kremen C, Gonigle LKM, Rader R, Ricketts TH, Williams NM, Adamson NL, Ascher JS, Báldi A, Batáry P, Benjamin F, Biesmeijer JC, Blitzer EJ, Bommarco R, Brand MR, Bretagnolle V, Button L, Cariveau DP, Chifflet R, Colville JF, Danforth BN, Elle E, Garratt MPD, Herzog F, Holzschuh A, Howlett BG, Jauker F, Jha S, Knop E, Krewenka KM, Féon VL, Mandelik Y, May EA, Park MG, Pisanty G, Reemer M, Riedinger V, Rollin O, Rundlöf M, Sardiñas HS, Scheper J, Sciligo AR, Smith HG, Stefan-Dewenter I, Thorp R, Tschamtkke T, Verhulst J, Viana BF, Vaissière BE, Veldtman R, Westphal C, Potts SG (2015) Delivery of crop pollination services is an insufficient argument for wild pollinator conservation. *Nature Communications*, 6, 7414.
- Knop E, Zoller L, Ryser R, Gerpe C, Hörler M, Fontaine C (2017) Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548, 206–209.
- Liu XW, Chesters D, Dai QY, Niu ZQ, Beckschäfer P, Martin K, Zhu CD (2017) Integrative profiling of bee communities from habitats of tropical southern Yunnan (China). *Scientific Reports*, 7, 5336.
- Miller-Struttmann NE, Geib JC, Franklin JD, Kevan PG, Holdo RM, Ebert-May D, Lynn AM, Kettenbach JA, Hedrick E, Galen C (2015) Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. *Science*, 349, 1541–1544.
- Moron D, Grezeš IM, Skórka P, Szentgyörgyi H, Laskowski R, Potts SG, Woyciechowski M (2012) Abundance and diversity of wild bees along gradients of metal pollution. *Journal of Applied Ecology*, 49, 118–125.
- Nicholls CI, Altieri MA (2013) Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 257–274.
- Ollerton J (2017) Pollinator diversity: Distribution, ecological, function, and conservation. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 353–376.
- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S (2011) How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120, 321–326.
- Ouyang ZY, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J, Xu W, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E, Jiang L, Lu F, Wang X, Yang G, Gong S, Wu B, Zeng Y, Yang W, Daily GC (2016) Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 352, 1455–1459.
- 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, 345–353.
- Potts SG, Imperatriz-Fonseca V, Ngo HT, Aizen MA, Biesmeijer JC, Breeze TD, Dicks LV, Garibaldi LA, Hill R, Settele J, Vanbergen AJ (2016) Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540, 220–229.
- Ren G, Young SS, Wang L, Wang W, Long Y, Wu R, Li J, Zhu J, Yu DW (2015) Effectiveness of China's National Forest Protection Program and nature reserves. *Conservation Biology*, 29, 1368–1377.
- Robbirt KM, Roberts DL, Hutchings MJ, Davy AJ (2014) Potential disruption of pollination in a sexually deceptive orchid by climatic change. *Current Biology*, 24, 2845–2849.
- Rodríguez A, Kouki J (2017) Disturbance-mediated heterogeneity drives pollinator diversity in boreal managed forest ecosystems. *Ecological Applications*, 27, 589–602.
- Sing KW, Wang WZ, Wan T, Lee PS, Li ZX, Chen X, Wang YY, Wilson JJ (2016) Diversity and human perceptions of bees (Hymenoptera: Apoidea) in Southeast Asian megacities. *Genome*, 59, 827–839.
- Tan K, Chen WW, Dong SH, Liu X, Wang Y, Nieh JC (2014) Imidacloprid alters foraging and decreases bee avoidance of predators. *PLoS ONE*, 9, e102725.
- Tan K, Chen WW, Dong SH, Liu X, Wang Y, Nieh JC (2015) A neonicotinoid impairs olfactory learning in Asian honey bees (*Apis cerana*) exposed as larvae or as adults. *Scientific Reports*, 5, 10989.
- van der Valk H, Koomen I, Nocelli RCF, Ribeiro MdeF, Freitas BM, Carvallho SM, Kasina JM, Martins DJ, Maina G, Ngaruiya P, Gikungu MNM, Odhiambo C, Kinuthia W, Kipyab P, Blacquiere T, van der Steen J, Roessink I, Wassenberg J, Gemmill-Herren B (2013) Aspects Determining the Risk of Pesticides to Wild Bees: Risk Profiles for Focal Crops on Three Continents. Food and Agriculture Organization of

- the United Nations, Rome.
- Williams NM, Winfree R (2013) Local habitat characteristics but not landscape urbanization drive pollinator visitation and native plant pollination in forest remnants. *Biological Conservation*, 160, 10–18.
- Xia JP, Chen JY, Deng XZ (2010) Discussion on current situation and importance of pollination insects of *Camellia oleifera* Abel. in the future. *Hubei Forestry Science and Technology*, (4), 61–63. (in Chinese with English abstract) [夏剑萍, 陈京元, 邓先珍 (2010) 油茶传粉昆虫研究现状与今后研究重点探讨. *湖北林业科技*, (4), 61–63.]
- Xiang J, Tang Y (2005) Intensive agriculture and its environmental consequences. *World SCI-TECH R&D*, 27(6), 81–87. (in Chinese with English abstract) [向晶, 唐亚 (2005) 集约化农业及其环境效应. *世界科技研究与发展*, 27(6), 81–87.]
- Xu HL, Yang JW, Sun JR (2009) Current status on the study of wild bee-pollinators and conservation strategies in China. *Acta Phytophylacica Sinica*, 36, 371–376. (in Chinese with English abstract) [徐环李, 杨俊伟, 孙洁茹 (2009) 我国野生传粉蜂的研究现状与保护策略. *植物保护学报*, 36, 371–376.]
- Yang LL, Wu YR (1998) Species diversity of bees in different habitats in Xishuangbanna tropical forest region. *Chinese Biodiversity*, 6, 197–204. (in Chinese with English abstract) [杨龙龙, 吴燕如 (1998) 西双版纳热带森林地区不同生境蜜蜂的物种多样性研究. *生物多样性*, 6, 197–204.]
- Yu LS, Ji T, Zhang ZY, Xie WF, Huang SS (2009) Impacts of ecological environment on bees and safety processing of bee productions. *Apiculture of China*, 60(10), 45–47. (in Chinese) [于林生, 吉挺, 张中印, 谢文飞, 黄思思 (2009) 生态环境对蜜蜂与蜂产品安全生产的影响. *中国蜂业*, 60(10), 45–47.]
- Zhang JQ, Xue DY (2013) The impacts of rubber plantation on the eco-environment in Xishuangbanna of Yunnan Province. *China Population, Resources and Environment*, 23, 304–307. (in Chinese with English abstract) [张佳琦, 薛达元 (2013) 西双版纳橡胶林种植的生态环境影响研究. *中国人口·资源与环境*, 23, 304–307.]
- Zhou HP, Yan XS, Zhang HD, Zhang LQ, Wei LP (2012) Species diversity of understorey vegetation in rubber plantation in Xishuangbanna. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 33, 1444–1449. (in Chinese with English abstract) [周会平, 岩香甩, 张海东, 张丽谦, 魏丽萍 (2012) 西双版纳橡胶林下植被多样性调查研究. *热带作物学报*, 33, 1444–1449.]
- Zhou SF, Han CY (2011) Research progress and conservation strategies of insect pollinators of *Camellia oleifera* Abel. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 40(9), 8–10. (in Chinese with English abstract) [周士峰, 韩春叶 (2011) 油茶传粉昆虫研究现状和保护策略. *河南农业科学*, 40(9), 8–10.]
- Zhou Z, Hu SY, Tan YZ (2006) Ecological environment impact from large-scale rubber planting in Xishuangbanna. *Yunnan Environmental Science*, 25(Suppl.), 67–69. (in Chinese with English abstract) [周宗, 胡绍云, 谭应中 (2006) 西双版纳大面积橡胶种植与生态环境影响. *云南环境科学*, 25(增刊), 67–69.]
- Zhuo D (2017) Environmental Risk Management for China's Intensive Agricultural Land Use. PhD dissertation, China Agricultural University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [卓东 (2017) 高集约化农业土地利用的环境风险管理体系研究. 博士学位论文, 中国农业大学, 北京.]
- Ziska LH, Pettis JS, Edwards J, Hancock JE, Tomecek MB, Clark A, Dukes JS, Loladze I, Polley HW (2016) Rising atmospheric CO₂ is reducing the protein concentration of a floral pollen source essential for North American bees. *Proceeding of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283, 20160414.

(责任编辑: 黄双全 责任编辑: 黄祥忠)