

DOI: 10.5846/stxb201809172030

欧阳芳,王丽娜,闫卓,门兴元,戈峰.中国农业生态系统昆虫授粉功能量与服务价值评估.生态学报, 2019, 39(1): 131–145.

Ouyang F, Wang L N, Yan Z, Men X Y, Ge F. Evaluation of insect pollination and service value in China's agricultural ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 131–145.

中国农业生态系统昆虫授粉功能量与服务价值评估

欧阳芳¹, 王丽娜², 闫卓¹, 门兴元³, 戈峰^{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 山东农业大学 植物保护学院, 泰安 271000

3 山东农业科学院 植物保护研究所, 济南 250100

摘要: 所有开花植物中大约有 80% 的物种需要动物作为授粉媒介。系统介绍了中国重要栽培作物花的结构和类型、授粉过程、媒介和方式、作物对昆虫授粉的依赖程度、昆虫授粉功能与服务的概念, 以及昆虫授粉功能量与服务价值量的评估方法; 同时评估了我国各省农业生态系统中昆虫对重要作物的授粉功能量与服务价值量。结果表明: 粮食作物、水果作物、蔬菜作物和经济作物不同程度的依赖昆虫授粉。根据 2015 年主要农作物产量、作物产品价格、昆虫授粉依赖程度等数据, 计算得出昆虫对我国 22 类主要农作物的授粉功能量为 1.8 亿吨农产品产量和授粉服务价值为 8860.5 亿元(占当年 GDP 的 1.3%), 具有巨大的经济价值。2015 年昆虫对主要栽培作物的授粉功能量和服务价值排在前五名的都是山东、河南、河北、陕西和新疆, 年授粉服务价值均大于 500 亿元, 反映出这 5 个省的主要农作物对昆虫授粉依赖程度较高。昆虫对作物的授粉功能量评价有助于了解昆虫对作物生物量或产量的生物学和生态学效应以及作物对昆虫授粉的需求。昆虫对作物的授粉服务价值评估有助于掌握昆虫授粉为人类所带来的经济效应或经济价值, 并帮助决策维持或增强授粉昆虫多样性和种群数量的人力、物力和财力投入。

关键词: 昆虫授粉功能; 昆虫授粉服务价值; 授粉功能量评估; 授粉服务价值评估; 昆虫多样性

Evaluation of insect pollination and service value in China's agricultural ecosystems

OUYANG Fang¹, WANG Lina², YAN Zhuo¹, MEN Xingyuan³, GE Feng^{1,*}

1 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Department of Plant Protection, Shandong Agriculture University, Tai'an 271000, China

3 Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jin'an 250100, China

Abstract: Approximately 80 percent of all flowering plants require animals as pollinators. In this study, we systematically examined the structure and types of flowers, pollination process, media and methods, dependence of crops on insect pollination, concept of insect pollination function and service, and evaluation methods of insect pollination function and service value. The quantity of pollination function and the value of pollination service by insects in the agricultural ecosystem were evaluated. The results showed that food crops, fruits, vegetables, and commercial crops depend on insect pollination to some extent. Based on insect pollination dependence, crop yields, and crop prices in 2015, we found that quantity of pollination function for 22 types of major crops in China was 180 million tons. The value of pollination services was 886.05 billion RMB. The value of insect pollination services to major crops accounted for 1.3% of the GDP in 2015, which is of great economic value. At the provincial level, the quantity of pollination function and the value of pollination service for major cultivated crops in 2015 were ranked among the top five in Shandong, Henan, Hebei, Shaanxi, and Xinjiang, with

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503402)

收稿日期: 2018-09-17; 修订日期: 2018-11-08

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

the annual pollination service value exceeding 50 billion RMB. These results indicate that the main crops in these five provinces are highly dependent on insect pollination. Evaluating the pollination function is important for understanding the biological and ecological effects of insects on the biomass or yield of crops. Studies of the value of insect pollination service can reveal the economic effect or economic value of insect pollination. And it also help and support the decision maker or manager in determining whether to invest in the corresponding manpower, material resources, and financial resources to maintain or enhance the diversity and population quantity of pollinated insects for cultivated crops.

Key Words: insect pollination function; insect pollination service value; pollination function evaluation; pollination service value evaluation; insect diversity

所有开花植物中大约有 80% 的物种需要动物为其授粉,昆虫类群是占有较大比例的授粉媒介。昆虫传粉功能对许多粮食、蔬菜、果树、园艺、牧草等作物不可或缺,能够服务于人类作物生产,体现出服务价值。人类在科学研究和农牧业生产中,随着认识的拓展已将传粉昆虫作为重要研究对象。基于人类与昆虫之间的密切关系,欧阳芳等提出昆虫生态功能与服务的概念和类型,认为昆虫是生物多样性最丰富的物种类群,其在维持生态系统功能、维系并保持着自然界的生态平衡、满足人类需求中的具有重要作用^[1]。作为生态系统功能与服务的重要组成部分,昆虫生态功能与服务是指昆虫类群在生态系统过程中发挥的功能作用,以及为人类提供的各种收益,包括有形收益的产品和无形收益的服务^[1]。昆虫传粉功能是非常重要的昆虫生态功能,即昆虫通过传递植物花粉,利于植物成功受精、结果实、结种子以及植物的持续繁衍。昆虫传粉功能服务于人类作物生产,对作物产量的增加、品质的改善与降低人力授粉成本具有巨大服务价值。欧阳芳等利用昆虫生态服务价值的定量估算方法,基于 2007 年统计数据,计算分析了我国农业生产中昆虫传粉功能的服务价值^[2]。然而,在不同区域如我国不同省份种植的作物类型和作物面积有巨大差异,如何评估不同区域的授粉功能量和服务价值需要客观的评价方法。

近几十年以来,由于中国经济高速发展,人类生产活动强度和频次的增加加剧了对生态系统的影响。授粉昆虫作为生态系统中的重要组成部分,也会受到环境因素的变化胁迫。比如,城镇化建设、规模化与设施农业的迅速发展会造成传粉昆虫栖息地急剧减少,蜜源植物减少,从而影响传粉昆虫种类和数量。化学农药的滥用和全球气候变化也会使传粉昆虫种类和数量减少。从而,传粉昆虫在生态系统中发挥的功能作用会受到影响。因此,目前及时开展传粉昆虫多样性、传粉昆虫与植物的相互适应、环境对传粉昆虫的影响和传粉昆虫的保护与利用等研究具有重要性和紧迫性。有研究表明:野生昆虫物种多样性对许多农作物的授粉具有重要价值^[3,4],甚至比人工饲养的蜜蜂更为有效。野生昆虫授粉产生比蜜蜂授粉多两倍的座果^[5]。评估中国各省农业生态系统中授粉功能量与服务价值是保护与利用昆虫生物多样性,发挥其生态功能与服务的重要基础。

本文系统介绍了中国重要栽培作物花的结构和类型,授粉过程、媒介和方式,作物对昆虫授粉的依赖程度,昆虫授粉功能与服务的概念,以及昆虫授粉功能量与服务价值量的评估方法;同时评估了我国各省农业生态系统中昆虫对重要作物的授粉功能量与服务价值量。本文涉及的重要栽培作物种类按用途和植物学系统相结合分类:1) 粮食作物,2) 果树作物,3) 蔬菜作物,4) 经济作物。

1 材料与方法

1.1 植物花的结构和类型

花的结构,被子植物花的结构一般包括花柄、花托、花萼(萼片)、花冠(花瓣)、雄蕊和雌蕊。雄蕊由花药和花丝组成,雌蕊由柱头、花柱和子房(内有胚珠)组成。雄蕊和雌蕊是花的主要部分,因为它们与果实和种子的形成有直接关系。花萼和花冠在开花前保护花蕊。花托是着生花的部位。花柄起支持和输导作用。

花的类型,从花蕊的组成看,包括两性花和单性花。两性花是一朵花中同时具有雄蕊和雌蕊。如(桃花、百合花)。单性花是一朵花中只有雄蕊或雌蕊的花。生有单性花的植物,包括雌雄同株植物,黄瓜、玉米、蓖

麻等。雌雄异株植物 杨、柳、菠菜等。

从花的着生位置看,包括单生花和花序。单生花: 每朵花都单独着生在茎上,其特点是花朵较大,例如: 桃、百合、黄瓜的花。花序: 花按照一定的顺序着生在花轴上,其特点是单花较小,不明显,利于传粉、受精,例如: 向日葵、玉米、柳树等。

1.2 授粉过程、媒介和方式

授粉,也称为传粉,一般是开花植物(被子植物)的成熟花粉从雄蕊花药或小孢子囊中散出后,借助于媒介的外力作用传送到雌蕊柱头或胚珠上,并能正常受精结实的过程。

授粉媒介,包括风、水和动物等。但全球种植作物和野生植物授粉主要由动物媒介完成,动物授粉者主要是各类昆虫,如膜翅类、蝇类、甲虫类、蝴蝶和蛾类等。

授粉方式,通过各类授粉媒介形成两类不同的授粉方式,自花授粉和异花授粉。

1.3 植物对昆虫授粉的依赖程度

在授粉昆虫作为媒介的外力作用下,提高栽培作物花的授粉和授精成功率,从而提高了座果率、结实率和结籽率,有利于作物增加产量和改善品质。植物对授粉昆虫的依赖程度一般用作物的增产效果来定量评价。依赖程度评估方法,

$$D_i = \frac{\text{Yield}_{i, \text{open}} - \text{Yield}_{i, \text{closed}}}{\text{Yield}_{i, \text{open}}}$$

D_i 农作物 i 对昆虫授粉的依赖程度,或授粉昆虫对作物的增产效果; $\text{Yield}_{i, \text{open}}$ 在开放的或者昆虫自由授粉的区域中农作物 i 的产量; $\text{Yield}_{i, \text{closed}}$ 在控制的或者避免昆虫授粉的区域中农作物 i 的产量。根据作物对昆虫授粉的依赖程度分为以下 5 个级别:

第一级 不依赖,作物因昆虫授粉而增加的产量比例范围为: $D=0$ 。

第二级 低度依赖,作物因昆虫授粉而增加的产量比例范围为: $0 < D < 10\%$;

第三级 中度依赖,作物因昆虫授粉而增加的产量比例范围为: $10\% \leq D < 40\%$;

第四级 高度依赖,作物因昆虫授粉而增加的产量比例范围为: $40\% \leq D < 90\%$;

第五级 极度依赖,作物因昆虫授粉而增加的产量比例范围为: $90\% \leq D \leq 100\%$;

外还有一些作物对昆虫授粉的依赖程度不明确(Unknown)。

1.4 昆虫授粉功能与服务

昆虫在开花植物上取食或者采集花蜜和花粉过程中,同时将植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,这一过程称之为昆虫授粉功能。授粉昆虫包括野生授粉者与驯养授粉者。授粉昆虫协助栽培作物或者野生植物的生殖器官(花)完成授粉过程后,保障植物授精的顺利进行,花器官发育成果实和种子。昆虫授粉为保障农作物产量和品质,以及人类赖以生存的生态系统中野生植物的发育与繁衍提供服务。

1.5 昆虫授粉功能量与服务价值的评估方法

昆虫授粉过程能够服务于人类栽培作物的生产,使农作物增加产量和改善品质,从而产生社会经济价值;也服务于野生植物的发育与繁衍,使生态系统植物类群可持续繁育,增加生物量,增加氧气的释放,以及二氧化碳的储存等,从而产生生态服务价值。评价昆虫授粉功能量与服务价值量是维持昆虫生物多样性,保护昆虫授粉者和维护昆虫授粉过程的重要基础。目前昆虫授粉功能量与服务价值量的评估植物对象包括两大类,即栽培作物的生产和野生植物的发育与繁衍。到现阶段为止,人们主要关注栽培作物生产的昆虫授粉评估。

Morse and Calderone 采用了昆虫传粉依赖性方法估算了蜜蜂授粉在美国 1989 年和 2000 年对农业的价值^[6]。其昆虫传粉服务功能价值评估方法如下:

昆虫授粉的功能量估算方法:

$$PF_{dp} = \sum_i (Y_i \cdot D_i \cdot P_i)$$

$$PF_{np} = \sum_i [Y_i \cdot D_i \cdot (1 - P_i)]$$

$$PF = PF_{dp} + PF_{np}$$

$$PF = \sum_i [Y_i \cdot D_i]$$

式中, PF 为驯养和野生昆虫对各类虫媒传粉作物实物产量的贡献总和; PF_{dp} 为驯养昆虫对各类虫媒传粉作物实物产量的贡献之和; PF_{np} 为野生昆虫对各类虫媒传粉作物实物产量的贡献之和; Y_i 为第 i 种作物的实物产量; D_i 为第 i 种作物对昆虫授粉的依赖程度; P_i 为驯养授粉昆虫在第 i 种作物的有效昆虫传粉者中的比例估计值; $(1 - P_i)$ 为野生授粉昆虫在第 i 种作物的所有有效昆虫传粉者中的比例。

昆虫授粉的服务价值估算方法:

$$PS_{dp} = \sum_i (Y_i \cdot D_i \cdot PR_i \cdot P_i)$$

$$PS_{np} = \sum_i [Y_i \cdot D_i \cdot PR_i \cdot (1 - P_i)]$$

$$PS = PS_{dp} + PS_{np}$$

$$PS = \sum_i [Y_i \cdot D_i \cdot PR_i]$$

式中, PS 为驯养和野生昆虫对各类虫媒作物产量授粉服务价值的贡献总和; PS_{dp} 为驯养昆虫对各类虫媒作物产量授粉服务价值的贡献之和; PS_{np} 为野生昆虫对虫媒作物产量授粉服务价值贡献之和; PR_i 为第 i 种作物的价格。

2 结果与分析

2.1 主要栽培作物花的类型、授粉媒介、授粉方式及其授粉依赖程度

汇总分析了中国主要栽培作物花的类型、授粉媒介、授粉方式及其授粉依赖程度。其中粮食作物 24 种, 果树作物 41 种, 蔬菜作物 23 种, 经济作物 19 种(表 1)。

2.1.1 粮食作物

(1) 禾谷类作物 大多数禾谷类作物通过风媒授粉, 包括水稻、小麦、玉米、高粱、大麦、粟米、燕麦、黑麦、藜麦; 它们的花属于两性花和花序; 它们对昆虫传粉依赖等级为不依赖。但是荞麦对昆虫传粉依赖等级为高度依赖。

(2) 豆类作物 蚕豆通过风媒和虫媒授粉, 它对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。菜豆、木豆、四季豆(芸豆或菜豆)、豇豆通过风媒和虫媒授粉, 它对昆虫传粉依赖等级为低度依赖。鹰嘴豆、兵豆、羽扇豆、豌豆对昆虫传粉依赖等级为不依赖。

(3) 薯类作物 薯类作物或称根茎类作物。木薯、马铃薯、甘薯、甘薯等并不需要通过昆虫授粉增加繁殖器官; 芋头对昆虫传粉依赖等级为不依赖。

2.1.2 水果作物

(1) 仁果类 苹果、梨、榲桲等属于异花授粉, 其对昆虫传粉依赖等级为高度依赖。

(2) 核果类 桃子、扁桃、杏子、樱桃、酸樱桃、李、枣属于异花授粉, 其对昆虫传粉依赖等级为高度依赖。

(3) 浆果类 此类作物大多需要虫媒来异花授粉。猕猴桃属于单性花, 它对昆虫传粉依赖等级为极度依赖。柿子、越橘、蓝莓、树莓对昆虫传粉依赖等级为高度依赖。草莓、醋栗、无花果、醋栗果(俗称黑加仑)对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。葡萄具备单性花或两性花, 圆锥花序, 通过虫媒和风媒完成自花授粉和异花授粉, 它对昆虫传粉依赖等级为低度依赖。

(4) 坚果类 板栗或栗子单性花通过虫媒和风媒完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。核桃、榛子、开心果属于单性花和异花授粉, 但是目前并不明确它们对昆虫传粉依赖程度。

表 1 栽培植物分类学地位、花的类型、授粉媒介、授粉方式及其授粉依赖程度

Table 1 Crop category ,Floral morphology , Pollinators , Pollinating ways , and Dependence degree or grade upon insect pollination											
作物名称 Crop common	分类地位 Crop category		花的形态 Floral morphology		授粉媒介 Pollinators		授粉方式 Pollinating ways		昆虫传粉依赖程度和等级 Dependence degree or grade upon insect pollination		
	科 Family	属 Genus	花蕊组成 (单性花或两性花)	着生位置 (单生花或花序)	授粉媒介 (虫媒或风媒)	授粉方式 (自花授粉和异花授粉)	最小 Min	最大 Max	均值 Mean	极度、高度、中度、低度、不依赖、未知	
1.粮食作物 Food crop											
(1) 禾谷类作物 Cereal crops 绝大部分属禾本科											
水稻 Rice	禾本科 Gramineae	稻属 <i>Oryza</i>	两性花	花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖	
小麦 Wheat	禾本科 Gramineae	小麦属 <i>Triticum</i>	两性花	花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖	
玉米 Maize	禾本科 Gramineae	玉蜀黍属 <i>Zea</i>	单性花	花序	风媒	异花授粉	0	0	0	不依赖	
高粱 Sorghum	禾本科 Gramineae	高粱属 <i>Sorghum</i>	两性花	花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖	
大麦 Barley	禾本科 Gramineae	大麦属 <i>Hordeum</i>	两性花	花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖	
粟米 Millet	禾本科 Gramineae	狗尾草属 <i>Setaria</i>	两性花	花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖	
燕麦 Oats	禾本科 Gramineae	燕麦属 <i>Avena</i>	两性花	花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖	
黑麦 Rye	禾本科 Gramineae	黑麦属 <i>Secale</i>	两性花	花序	风媒	异花授粉	0	0	0	不依赖	
藜麦 Quinoa	藜科 Chenopodiaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	两性花	花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖	
荞麦 Buckwheat	蓼科 Polygonaceae	荞麦属 <i>Fagopyrum</i>	两性花	花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度	
(2) 豆类作物 Legume crop(或称藎谷类作物) 属豆科 主要提供植物性蛋白质											
蚕豆 Broad beans , horse beans	豆科 Leguminosae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	两性花	花序	虫媒、风媒	常异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度	
菜豆 Beans	豆科 Leguminosae	菜豆属 <i>Phaseolus</i>	两性花	花序	虫媒、风媒	常异花授粉	0	0.1	0.05	低度	
木豆 Pigeon peas	豆科 Leguminosae	木豆属 <i>Cajanus</i>	两性花	花序	虫媒、风媒	常异花授粉	0	0.1	0.05	低度	
四季豆/芸豆/菜豆 Kidney bean	豆科 Leguminosae	菜豆属 <i>Phaseolus</i>	两性花	花序	虫媒、风媒	常异花授粉	0	0.1	0.05	低度	
豇豆 Cow peas , dry	豆科 Leguminosae	豇豆属 <i>Vigna</i>	两性花	花序	虫媒、风媒	常异花授粉	0	0.1	0.05	低度	
鹰嘴豆 Chick peas	豆科 Leguminosae	鹰嘴豆属 <i>Cicer</i>	两性花	花序	未知	未知	0	0	0	不依赖	
兵豆 Lentils	豆科 Leguminosae	兵豆属 <i>Lens</i>	两性花	花序	未知	未知	0	0	0	不依赖	
羽扇豆 Lupins	豆科 Leguminosae	羽扇豆属 <i>Lupinus</i>	两性花	花序	未知	未知	0	0	0	不依赖	
豌豆 Peas	豆科 Leguminosae	豌豆属 <i>Pisum</i>	两性花	花序	闭花授粉	自花授粉	0	0	0	不依赖	
(3) 薯类作物 Tuber crops:(或称根茎类作物 Roots and Tubers) 主要生产淀粉类食物											
木薯 Cassava	大戟科 Euphorbiaceae	木薯属 Manihot	单性花	花序	虫媒	异花授粉	—	—	—	增加繁殖器官	
马铃薯 Potatoes	茄科 Solanaceae	茄属 Solanum	两性花	花序	风媒	自花授粉	—	—	—	增加繁殖器官	
甘薯 Sweet potatos (红薯 薯蓣属)	薯蓣科 Dioscoreaceae	薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	单性花	花序	未知	异花授粉	—	—	—	增加繁殖器官	

续表1

作物名称 Crop common	分类地位 Crop category		花的形态 Floral morphology		授粉媒介 Pollinators (虫媒或风媒)	授粉方式 Pollinating ways 授粉方式(自花授粉和异花授粉)	昆虫传粉依赖程度和等级 Dependence degree or grade upon insect pollination		
	科 Family	属 Genus	花蕊组成 (单性花或两性花)	着生位置 (单生花或花序)			最小 Min	最大 Max	均值 Mean
甘薯 Sweet potatos (番薯 番薯属)	旋花科 Convolvulaceae	番薯属 <i>Ipomoea</i>	两性花	花序	未知	异花授粉	—	—	—
芋头 Taro (cocoyam)	天南星科 Araceae	芋属 <i>Colocasia</i>	单性花	花序	退化	退化	0	0	0
2.水果作物 Fruit crops									
(1) 仁果类 Kernel fruits									
苹果 Apples	蔷薇科 Rosaceae	苹果属 <i>Malus</i>	两性花	伞房花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
梨 Pears	蔷薇科 Rosaceae	梨属 <i>Pyrus</i>	两性花	伞形总状花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
榲桲 Quinces	蔷薇科 Rosaceae	榲桲属 <i>Cydonia</i>	两性花	单生花	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
(2) 核果类 Stone fruit									
桃子 Peach	蔷薇科 Rosaceae	桃属 <i>Amygdalus</i>	两性花	单生花	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
扁桃 Almonds	蔷薇科 Rosaceae	桃属 <i>Amygdalus</i>	两性花	单生花	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
杏子 Apricot	蔷薇科 Rosaceae	杏属 <i>Armeniaca</i>	两性花	单生花	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
櫻桃 Cherry	蔷薇科 Rosaceae	櫻属 <i>Cerasus</i>	两性花	伞房花序(近伞形)	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
酸櫻桃 Sour cherry	蔷薇科 Rosaceae	櫻属 <i>Cerasus</i>	两性花	伞形花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
李/李子干 Plum/prune	蔷薇科 Rosaceae	李属 <i>Prunus</i>	两性花	单生花(三朵并生)	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
枣 Jujube	鼠李科 Rhamnaceae	枣属 <i>Ziziphus</i>	两性花	单生或2—8个 密集成腋生 聚伞花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
(3) 浆果类 berry fruit									
猕猴桃 Kiwifruit	猕猴桃科 Actinidiaceae	猕猴桃属 <i>Actinidia</i>	单性花	单生或排成 简单的或分歧的 聚伞花序	虫媒	异花授粉	0.9	1	0.95
柿子 Persimmons	柿科 Ebenaceae	柿属 <i>Diospyros</i>	单性花	聚伞花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
越橘 Cranberry	杜鹃花科 Ericaceae	越橘属 <i>Vaccinium</i>	两性花	总状花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
蓝莓 Blueberry	杜鹃花科 Ericaceae	越橘属 <i>Vaccinium</i>	两性花	总状花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
树莓 Raspberry	蔷薇科 Rosaceae	悬钩子属 <i>Rubus</i>	两性花	单生花	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65
草莓 Strawberry	蔷薇科 Rosaceae	草莓属 <i>Fragaria</i>	两性花	聚伞花序	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25
醋栗 Gooseberry	虎耳草科 Saxifragaceae	茶藨子属 <i>Ribes</i>	两性花	短总状花序或单生	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25
无花果 Figs	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	单性花	单生花	虫媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25

续表1

作物名称 Crop common	分类地位 Crop category		花的形态 Floral morphology		授粉媒介 Pollinators 授粉媒介 (虫媒或风媒)	授粉方式 Pollinating ways 授粉方式(自花授粉和异花授粉)	昆虫传粉依赖程度和等级 Dependence degree or grade upon insect pollination			
	科 Family	属 Genus	花蕊组成 (单性花或两性花)	着生位置 (单生花或花序)			最小 Min	最大 Max	均值 Mean	极度、高度、中度、低度、不依赖、未知
醋栗果 俗称黑加仑 Currants	虎耳草科 Saxifragaceae	茶藨子属 Ribes	两性花	总状花序	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
葡萄 Grapes	葡萄科 Vitaceae	葡萄属 Vitis	单性花	圆锥花序	虫媒、风媒	自花授粉、异花授粉	0	0.1	0.05	低度
(4) 坚果类 Nut fruits										
板栗 栗子 Chestnuts	壳斗科 Fagaceae	栗属 Castanea	单性花	3—5 朵聚生成簇	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
核桃 Walnuts , with shell	胡桃科 Juglandaceae	胡桃属 Juglans	单性花	雄性柔荑花序， 雌性穗状花序	风媒	异花授粉				不明确
榛子 Hazelnuts	桦木科 Betulaceae	榛属 Corylus	单性花	雄花序单生	虫媒、风媒	异花授粉				不明确
开心果 Pistachios	漆树科 Anacardiaceae	黄连木属 Pistacia	单性花	圆锥花序	风媒	异花授粉				不明确
(5) 柑橘类 Citrus fruits										
柑橘 Tangerine	芸香科 Rutaceae	柑橘属 Citrus	两性花	花单生或 2—3 朵簇生	虫媒、风媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度
橘柚 Tangelo	芸香科 Rutaceae	金橘属 Fortunella	两性花	单朵腋生或数 朵簇生于叶腋	虫媒、风媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度
葡萄柚 Grapefruit	芸香科 Rutaceae	柑橘属 Citrus	两性花	总状花序， 稀少或单花腋生	虫媒、风媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度
橙子 Orange	芸香科 Rutaceae	柑橘属 Citrus	两性花	单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
柠檬 Lemon	芸香科 Rutaceae	柑橘属 Citrus	单性花	单花腋生或 少花簇生	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
酸橙 Lime	芸香科 Rutaceae	柑橘属 Citrus	有单性花倾向	总状花序有花 少数 有时兼有 腋生单花	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
(6) 热带、亚热带果树 Tropical and subtropical fruit trees										
芒果 Mango	漆树科 Anacardiaceae	芒果属 Mangifera	两性花	圆锥花序	虫媒、风媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度
油梨牛油果 鳄梨 Avocado	山榄科 Sapotaceae	牛油果属 Butyrospermum	两性花	聚伞状圆锥花序	虫媒、风媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度
荔枝 Litchis	无患子科 Sapindaceae	荔枝属 Litchi	两性花	花序	虫媒、风媒	异花授粉	0	0.1	0.05	低度
龙眼 Longans	无患子科 Sapindaceae	龙眼属 Dimocarpus	两性花	花序	虫媒、风媒	异花授粉	0	0.1	0.05	低度
腰果 Cashewapple	漆树科 Anacardiaceae	腰果属 Anacardium	两性花	圆锥花序	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度
椰子 Coconuts	棕榈科 Palmae	椰子属 Cocos	单性花	花序	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
槟榔 Arecanuts	棕榈科 Palmae	槟榔属 Areca	单性花	单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0	0.1	0.05	低度
番木瓜 Papayas	番木瓜科 Caricaceae	番木瓜属 Carica	单性花或两性花	圆锥花序、伞房 花序或单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0	0.1	0.05	低度

http://www.ecologica.cn

续表1

作物名称 Crop common	分类地位 Crop category		花的形态 Floral morphology		授粉媒介 Pollinators 授粉媒介 (虫媒或风媒)	授粉方式 Pollinating ways 授粉方式(自花授粉和异花授粉)	昆虫传粉依赖程度和等级 Dependence degree or grade upon insect pollination			
	科 Family	属 Genus	花蕊组成 (单性花或两性花)	着生位置 (单生花或花序)			最小 Min	最大 Max	均值 Mean	极度、高度、中度、低度、不依赖、未知
香蕉 Bananas	芭蕉科 Musaceae	芭蕉属 <i>Musa</i>	单性花	穗状花序	虫媒、风媒	自花授粉、异花授粉	—	—	—	增加繁殖器官
菠萝 Pineapple	凤梨科 Bromeliaceae	凤梨属 <i>Ananas</i>	未知	花序	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加繁殖器官
海枣 Dates	棕榈科 Palmae	刺葵属 <i>Phoenix</i>	单性花	圆锥花序	虫媒、风媒	异花授粉	0	0	0	不依赖
3.蔬菜作物 Vegetable crops										
(1) 瓜类蔬菜 Gourd vegetables										
黄瓜 Cucumber	葫芦科 Cucurbitaceae	黄瓜属 <i>Cucumis</i>	单性花	单生花或簇生	虫媒、风媒	异花授粉	0.9	1	0.95	极度
甜瓜 Muskmelons	葫芦科 Cucurbitaceae	黄瓜属 <i>Cucumis</i>	单性花	单生(雌)或簇生(雄)	虫媒、风媒	异花授粉	0.9	1	0.95	极度
南瓜 Pumpkin	葫芦科 Cucurbitaceae	南瓜属 <i>Cucurbita</i>	单性花	单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0.9	1	0.95	极度
西瓜 Watermelons	葫芦科 Cucurbitaceae	西瓜属 <i>Citrullus</i>	单性花	单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0.9	1	0.95	极度
其他瓜类 Other melons							0.9	1	0.95	极度
(2) 茄果类蔬菜 Solanaceous vegetables										
茄子 Eggplants (aubergines)	茄科 Solanaceae	茄属 <i>Solanum</i>	两性花	单生花	虫媒、风媒	自花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
辣椒 Chillies and peppers	茄科 Solanaceae	辣椒属 <i>Capsicum</i>	两性花	单生花	虫媒、风媒	自花授粉	0	0.1	0.05	低度
番茄 Tomato	茄科 Solanaceae	番茄属 <i>Solanum</i>	两性花	花序	虫媒、风媒	自花授粉	0	0.1	0.05	低度
(3) 根菜类蔬菜 Root vegetable										
萝卜 Radish	十字花科 Cruciferae	萝卜属 <i>Raphanus</i>	两性花	总状花序	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加种子
胡萝卜 Carrot	伞形科 Apiaceae	胡萝卜属 <i>Daucus</i>	两性花	复伞形花序	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加种子
(4) 白菜类蔬菜 Cabbage vegetable										
大白菜 Cabbage	十字花科 Cruciferae	芸苔属 <i>Brassica</i>	两性花	花序	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加种子
卷心菜 Cabbage patch	十字花科 Cruciferae	芸苔属 <i>Brassica</i>	两性花	总状花序	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加种子
(5) 甘蓝类蔬菜 kail vegetable										
花椰菜; 西兰花 Broccoli	十字花科 Cruciferae	芸苔属 <i>Brassica</i>	两性花	总状花序	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加种子
(6) 葱蒜类蔬菜 Bulb vegetable										
大蒜 Garlic	百合科 Liliaceae	葱属 <i>Alliaceae</i>	两性花	伞形花序	风媒	自花授粉	—	—	—	增加繁殖器官
大葱 Allium fistulosum	百合科 Liliaceae	葱属 <i>Alliaceae</i>	两性花	伞形花序	风媒	自花授粉	—	—	—	增加繁殖器官
洋葱 Onion	百合科 Liliaceae	葱属 <i>Alliaceae</i>	两性花	伞形花序	风媒	自花授粉	—	—	—	增加种子

续表1

作物名称 Crop common	分类地位 Crop category		花的形态 Floral morphology		授粉媒介 Pollinators 授粉媒介 (虫媒或风媒)	授粉方式 Pollinating ways 授粉方式(自花授粉和异花授粉)	昆虫传粉依赖程度和等级 Dependence degree or grade upon insect pollination			
	科 Family	属 Genus	花蕊组成 (单性花或两性花)	着生位置 (单生花或花序)			最小 Min	最大 Max	均值 Mean	极度、高度、中度、低度、不依赖、未知
(7) 绿叶蔬菜 Leaf vegetable										
菠菜 Spinach	藜科 Chenopodiaceae	菠菜属 Spinacia	单性花	球形团伞花序	虫媒、风媒	异花授粉	0	0	0	不依赖
芹菜 Celery	伞形科 Apiaceae	芹属 Apium	两性花	复伞形花序	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加种子
生菜: 菊苣 Lettuce and chicory	菊科 Compositae	莴苣属 Lactuca	两性花	圆锥花序	风媒	自花授粉	—	—	—	增加种子
薄荷 Peppermint	唇形科 Labiatae	薄荷属 Mentha	两性花	轮伞花序	虫媒、风媒	异花授粉	0	0	0	不依赖
(8) 多年生蔬菜 Perennial vegetable										
秋葵 Okra	锦葵科 Malvaceae	秋葵属 Abelmoschus	两性花	单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
芦笋 Asparagus	百合科 Liliaceae	天门冬属 Asparagus	单性花	每 1—4 朵腋生	虫媒、风媒	异花授粉	—	—	—	增加种子
洋蓟 Artichokes	菊科 Asteraceae	菜蓟属 Cynara	两性花	头状花序	未知	未知	—	—	—	增加种子
4. 经济作物 Commercial crop (或称工业原料作物 Industrial crop)										
(1) 纤维作物 Fibre crops										
棉花 Cotton	锦葵科 Malvaceae	棉属 属 Gossypium	两性花	单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
2) 油料作物 Oil crops 主要作物有食用油料作物和工业用油作物										
芝麻籽 Sesame seed	胡麻科 Pedaliaceae	胡麻属 Sesamum	两性花	花单生或 2—3 朵 同生于叶腋内	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
大豆 Soybeans	豆科 Leguminosae	大豆属 Glycine	两性花	总状花序或 单生花	风媒	自花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
葵花籽 Sunflower seed	菊科 Asteraceae	向日葵属 Helianthus	两性花	头状花序	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
芥菜籽 Mustard seed	十字花科 Cruciferae	芸苔属 Brassica	两性花	总状花序	虫媒、风媒	常异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
油菜籽 Rapeseed	十字花科 Cruciferae	芸苔属 Brassica	两性花	总状花序	虫媒、风媒	常异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
籽棉 Seed cotton	锦葵科 Malvaceae	棉属 Gossypium	两性花	单生花	虫媒、风媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
花生 Groundnuts	豆科 Leguminosae	落花生属 Arachis	两性花	单生花	闭花授粉	自花授粉	0	0.1	0.05	低度
亚麻籽 Linseed	亚麻科 Linaceae	亚麻属 Linum	两性花	单生 组成疏散 的聚伞花序	风媒	自花授粉	0	0.1	0.05	低度
棕榈果 Oil palm fruit	棕榈科 Palmae	棕榈属 Trachycarpus	单性花	花序	风媒	异花授粉	0	0.1	0.05	低度
红花籽 Safflower seed	菊科 Asteraceae	红花属 Carthamus	两性花	头状花序	风媒	自花授粉	0	0.1	0.05	低度
油橄榄 Olives	木犀科 Oleaceae	木犀属 Olea	两性花	圆锥花序	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖

续表 1

作物名称 Crop common	分类地位 Crop category		花的形态 Floral morphology		授粉媒介 Pollinators 授粉媒介 (虫媒或风媒)	授粉方式 Pollinating ways 授粉方式(自花授粉和异花授粉)	昆虫传粉依赖程度和等级 Dependence degree or grade upon insect pollination			
	科 Family	属 Genus	花蕊组成 (单性花或两性花)	着生位置 (单生花或花序)			最小 Min	最大 Max	均值 Mean	极值 低度、不依赖、未知
(3) 糖类作物 Sugar crops										
甜菜 Sugarbeet	藜科 Chenopodiaceae	甜菜属 <i>Beta</i>	两性花	花 2—3 朵团集	风媒	自花授粉	0	0	0	不依赖
甘蔗 Sugarcane	禾本科 Gramineae	甘蔗属 <i>Saccharum</i>	两性花	圆锥花序或总状花序	风媒	异花授粉	0	0	0	不依赖
(4) 嗜好类作物 Stimulant crops										
可可豆 Cocoa beans	梧桐科 Sterculiaceae	可可属 <i>Theobroma</i>	两性花	聚伞花序	虫媒	异花授粉	0.9	1	0.95	极度
可乐果 Kolanuts	梧桐科 Sterculiaceae	可乐果属 <i>Cola</i>	两性花	单生花	虫媒	异花授粉	0.4	0.9	0.65	高度
咖啡 Coffee	茜草科 Rubiaceae	咖啡属 <i>Coffea</i>	两性花	聚伞花序	虫媒	异花授粉	0.1	0.4	0.25	中度
茶 Tea	山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	两性花	单生花 腋生	虫媒	异花授粉	0	0	0	不依赖
(5) 牧草与绿肥作物 Pasture and green manure crops										
苜蓿 Alfalfa	豆科 Leguminosae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	两性花	总状花序	虫媒	异花授粉	0.9	1	0.95	极度

(5) 柑橘类 柑橘、橘柚、葡萄柚属于两性花, 需要通过虫媒或风媒完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为高度依赖。橙子、柠檬、酸橙对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。

(6) 热带、亚热带果树 芒果、油梨(牛油果或称鳄梨)、腰果属于两性花, 需要通过风媒和虫媒完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为高度依赖。椰子对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。荔枝、龙眼、槟榔、番木瓜对昆虫传粉依赖等级为低度依赖。海枣通过风媒就可以完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为不依赖。

2.1.3 蔬菜作物

(1) 瓜类蔬菜 黄瓜、甜瓜、南瓜、西瓜等其他瓜类属于单性花, 需要通过虫媒完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为极度依赖。

(2) 茄果类蔬菜 茄子属于虫媒和风媒完成自花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。辣椒和番茄对昆虫传粉依赖等级为低度依赖。

(3) 根菜类蔬菜 萝卜和胡萝卜通过虫媒或风媒完成异花授粉。昆虫授粉不一定直接增加根菜类蔬菜重量, 但是可以增加此类蔬菜的种子数量和品质。

(4) 白菜类蔬菜 大白菜、卷心菜通过虫媒或风媒完成异花授粉。昆虫授粉同样不一定直接增加白菜类蔬菜重量, 但是可以增加此类蔬菜的种子数量和品质。

(5) 甘蓝类蔬菜 花椰菜或西兰花同样通过虫媒或风媒完成异花授粉。昆虫授粉不一定直接增加甘蓝类蔬菜重量, 但是可以增加此类蔬菜的种子数量和品质。

(6) 葱蒜类蔬菜 大蒜、大葱、洋葱属于两性花和伞形花序, 通过风媒完成自花授粉, 增加繁殖器官重量。

(7) 绿叶蔬菜 菠菜、薄荷通过虫媒或风媒完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为不依赖。昆虫授粉同样不一定直接增加芹菜、生菜或菊苣重量, 但是可以增加此类蔬菜的种子数量和品质。

(8) 多年生蔬菜 秋葵通过虫媒或风媒完成异花授粉, 它对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。类似地, 昆虫授粉不一定直接增加芦笋、洋葱重量, 但是可以增加它们的种子数量和品质。

2.1.4 经济作物

(1) 纤维作物 棉花通过虫媒或风媒完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。

(2) 油料作物 芝麻籽、大豆、葵花籽、芥菜籽、油菜籽、籽棉对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。花生、亚麻籽、棕榈果、红花籽对昆虫传粉依赖等级为低度依赖。油橄榄对昆虫传粉依赖等级为不依赖。

(3) 糖类作物 甜菜和甘蔗属于两性花通过风媒完成自花授粉, 它们对昆虫传粉依赖等级为不依赖。

(4) 嗜好类作物 可可豆通过虫媒完成异花授粉, 对昆虫传粉依赖等级为极度依赖。可乐果对昆虫传粉依赖等级为高度依赖。咖啡对昆虫传粉依赖等级为中度依赖。茶对昆虫传粉依赖等级为不依赖。

(5) 牧草与绿肥作物 苜蓿通过虫媒完成异花授粉, 它对昆虫传粉依赖等级为极度依赖。

2.2 我国各省昆虫授粉功能量

采用昆虫授粉功能量估算方法, 根据收集的 2015 年我国各省主要农作物产量和作物对昆虫授粉依赖程度计算得出各省农业生态系统中昆虫对主要农作物授粉功能量。评估区域包括 31 个省级单位(全文数据中, 暂不包括我国香港、澳门、和台湾的统计数据)。评估的主要农作物包括 22 类, 其中粮食作物包括稻谷、小麦、玉米、谷子、高粱、其他谷物、大麦、大豆、绿豆、红小豆、马铃薯等 11 类; 水果作物包括苹果、梨、红枣、葡萄、柿子、草莓、柑桔、香蕉和菠萝等 9 类; 蔬菜作物包括西瓜、甜瓜、其他瓜类和其他蔬菜等 4 类; 经济作物包括棉花、花生、油菜籽、芝麻、向日葵、甘蔗、甜菜和茶叶等 8 类。

评估结果表明(图 1), 2015 年昆虫对我国 22 类主要农作物授粉功能量 1.8 亿吨。其中大于 1000 万吨的省份有: 山东、河南、河北、陕西和新疆。介于 500—1000 万吨之间的省份有: 安徽、湖南、广西、江苏、湖北、辽宁、四川和江西。介于 100—500 万吨之间的省份有: 山西、甘肃、广东、浙江、福建、内蒙古、黑龙江、宁夏、重庆、云南、吉林、贵州和海南。天津、上海、北京、青海和西藏低于 100 万吨。

2.3 我国各省昆虫授粉服务价值

采用昆虫授粉的服务价值估算方法, 在分析昆虫对主要农作物授粉功能量基础上, 考虑各类作物的价格,

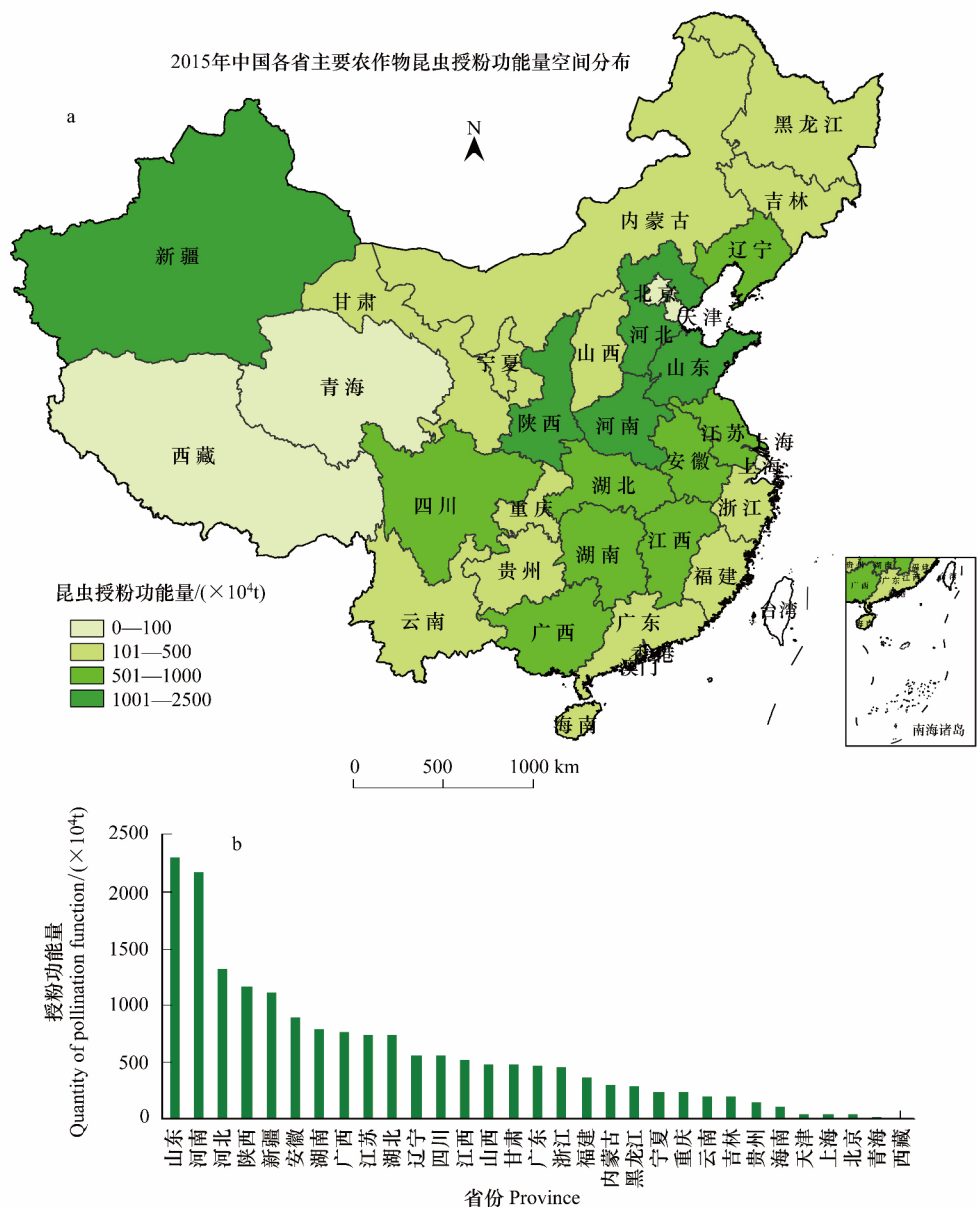


图1 2015年中国各省主要农作物昆虫授粉功能量
Fig.1 Quantity of pollination function for staple crop in China in 2015

从而得出昆虫对主要农作物授粉服务价值。与昆虫授粉功能量评估相对应,昆虫授粉服务价值评估区域同样包括31个省级单位。评估的主要农作物也是包括22类。

评估结果表明(图2)2015年昆虫对我国22类主要农作物授粉服务价值8860.5亿元。昆虫对主要农作物授粉服务价值大于500亿元的省份有:山东、陕西、河南、河北和新疆。介于300—500亿元之间的省份有:山西、广西、湖南、湖北、四川、广东、辽宁和甘肃。介于100—300亿元之间的省份有:江西、安徽、福建、江苏、浙江、重庆、黑龙江、内蒙古和云南。宁夏、吉林、贵州、海南、北京、上海、天津、青海和西藏低于100亿元。

3 讨论

3.1 作物对昆虫的授粉依赖程度

定量评价作物对昆虫的授粉依赖程度是评估昆虫授粉功能量和服务价值关键步骤。本文将中国重要栽培作物种类按用途和植物学系统相结合分类,以展示它们对昆虫的授粉依赖程度。重要栽培作物对昆虫的授

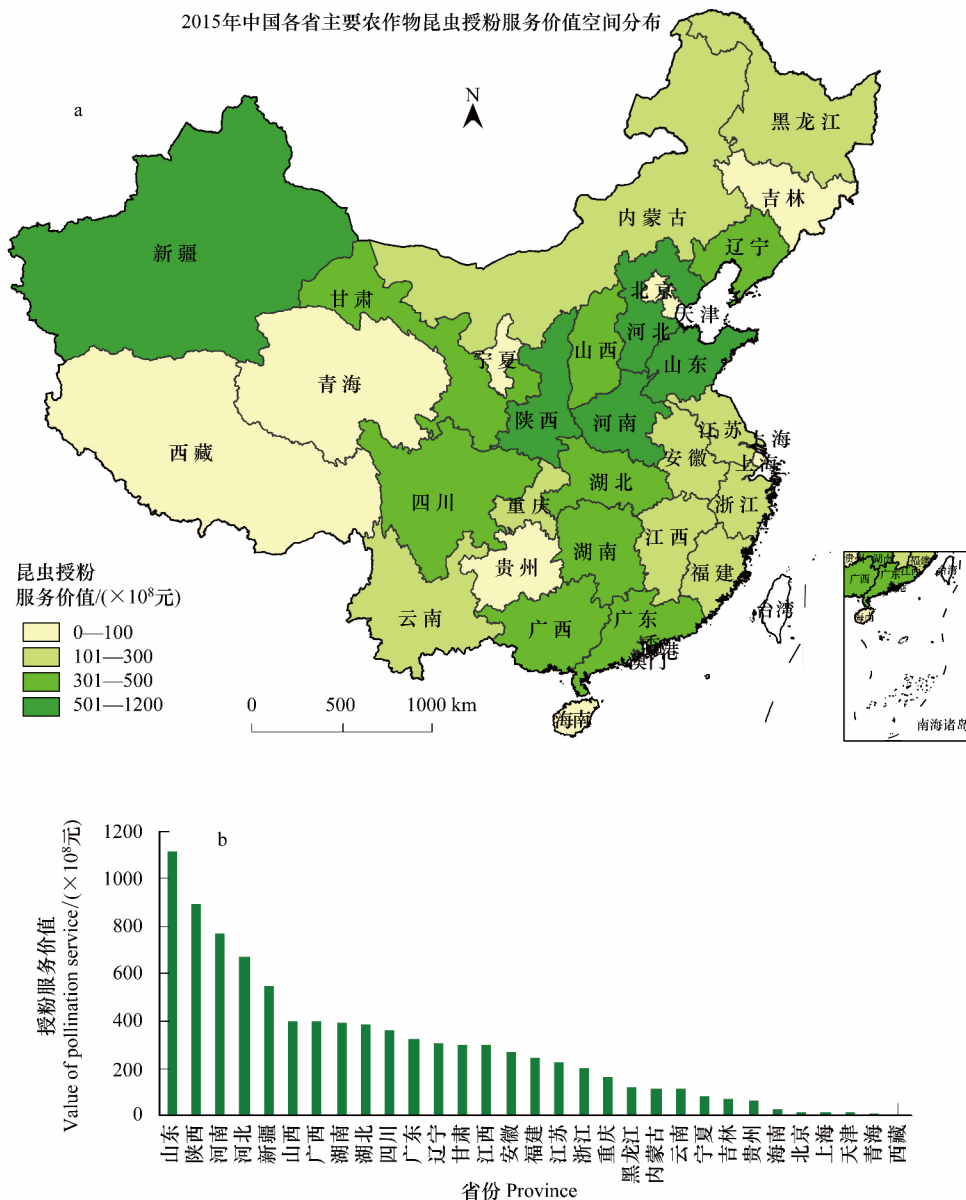


图2 2015年中国各省主要农作物昆虫授粉服务价值

Fig.2 Value of pollination service for staple crop in China in 2015

粉依赖程度主要参考 Morse^[6]、Klein^[7] 和 Losey^[8] 等人的研究方法。粮食作物中,只有禾谷类作物荞麦对昆虫传粉依赖等级为高度依赖,其他禾谷类作物为不依赖昆虫授粉。豆类作物对昆虫授粉依赖程度有中度、低度和不依赖等级。薯类作物或根茎类作物并不需要依赖昆虫授粉增加繁殖器官。水果作物中,仁果类和核果类作物高度依赖昆虫授粉;浆果类和坚果类作物也是不同等级程度依赖昆虫授粉;柑橘类作物高度或中度依赖昆虫授粉;大多数热带、亚热带果树不同等级程度依赖昆虫授粉。蔬菜作物中,瓜类蔬菜极度依赖昆虫授粉;茄果类蔬菜中度或低度依赖昆虫授粉;昆虫授粉能够增加根菜类、白菜类、甘蓝类、绿叶类和多年生蔬菜的种子数量和品质。经济作物中,大多数纤维作物、油料作物和嗜好类作物不同程度依赖昆虫传粉;牧草与绿肥作物如苜蓿极度依赖昆虫传粉。四类栽培作物不同程度的依赖昆虫授粉。昆虫授粉有利于提高四类栽培作物花的授粉和授精成功率,从而保证座果率、结实率和结籽率的提高,有利于作物增加产量和改善品质。孙翠清和赵芝俊通过分析 1999—2013 年近 15 年期间中国依赖蜜蜂授粉作物的种植数据,得出中国六大类 32 种依赖蜜蜂授粉作物的种植面积平均增长了 14.7%,增长较快的牧草、大田瓜果、木本水果恰恰也是对蜜蜂授粉依

赖程度更高的作物^[9]。但是目前国内关于作物对昆虫授粉依赖程度的田间试验结果,前期积累较少,研究的作物种类较少而且缺少系统性的研究。目前昆虫授粉依赖程度参数主要参考国外研究的数据结果。根据评估结果有些作物对昆虫授粉依赖程度等级为不依赖,当该类作物得到昆虫授粉后也会增加一定的产量。因此作物对昆虫的授粉依赖程度需要明确特定的条件。

3.2 昆虫对作物的授粉功能和服务价值

昆虫授粉是重要的生态系统服务功能。昆虫授粉功能在维持农业生态系统功能和稳定农业生产中发挥重要的作用。农作物从种子到成熟收获的整个全过程,需要种子或繁殖组织、土壤、水分、空气、营养元素、光照、昆虫授粉、人工管理和科学技术等各类因素共同的作用才能完成。以上各类因素对人类栽培作物的成长、发育和成熟过程都是不可或缺的,发挥着各自的作用功能,从而都产生价值。本文着重考虑昆虫授粉(包括野生授粉者 Native pollinators 与驯养授粉者 Domesticated pollinators)对农作物生长这一重要组成要素进行分析。评价昆虫对作物的授粉功能量是了解昆虫对作物生物量或产量的生物学和生态学效应,也可以反映出作物对昆虫授粉的需求量大小。作物的昆虫授粉功能量越大,其对昆虫授粉需要越大。评估昆虫对作物的授粉服务价值是掌握昆虫授粉为人类所带来的经济效应或经济价值。评估昆虫授粉服务价值的目的是在经济角度上权衡是否值得投入相应的人力、物力和财力来维持或增强授粉昆虫多样性和种群数量,以满足栽培作物对昆虫授粉的需求。

本文根据 2015 年主要农作物产量、作物产品价格、昆虫授粉依赖程度等数据,计算得出昆虫对我国 22 类主要农作物的授粉功能量为 1.8 亿吨和授粉服务价值为 8860.5 亿元。昆虫对主要农作物授粉服务价值占当年 GDP 的 1.3%(2015 年 GDP 为 68.9 万亿元),具有巨大的经济价值。安建东和陈文峰分析了 2008 年昆虫授粉对中国 44 种水果和蔬菜产生的经济价值为 521.7 亿美元(大约 3332.6 亿元)^[10]。欧阳芳等基于 2007 年统计数据分析了昆虫授粉在我国农业生产中 10 种水果,11 种蔬菜和 4 种大田作物传粉服务价值为 6790.30 亿元^[2]。虽然两篇文章中研究数据的时间相差一年,但是评估的昆虫授粉服务价值有一定的差异。这是因为两个分析中作物种类、数量、昆虫授粉依赖程度参数、作物价格以及评估方法均有差别造成的。从我国各层面来看,2015 年昆虫对主要栽培作物的授粉功能量和服务价值,排在前五名的都是山东、河南、河北、陕西和新疆,其授粉服务价值均大于 500 亿元。这五个省份的主要农作物种植面积和产量都是我国排名前列,也反映出这五个省的主要农作物对昆虫授粉依赖程度较高。本文仅仅考虑农田生态系统中的农作物,而草原生态系统中如牧草苜蓿极度依赖昆虫传粉,因此昆虫传粉也会对畜牧业也产生更多服务价值。

3.3 研究展望

建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计。加强生态文明建设举措包括构建生态廊道和生物多样性保护网络,提升生态系统质量和稳定性。昆虫生物多样性及其授粉功能与服务是生物多样性和生态系统服务功能的重要组成部分。昆虫授粉功能与服务价值评估研究的核心科学问题是作物对昆虫授粉的依赖程度。未来,一方面需要构建系统的统一的昆虫授粉科学评价体系;另一方面需要开展昆虫授粉(野生授粉者与驯养授粉者)对中国各类重要农作物生物学和生态学效应试验研究。

参考文献(References):

- [1] 欧阳芳,赵紫华,戈峰. 昆虫的生态服务功能. 应用昆虫学报, 2013, 50(2): 305-310.
- [2] 欧阳芳,吕飞,门兴元,赵紫华,曾菊平,肖云丽,戈峰. 中国农业昆虫生态调节服务价值估算. 生态学报, 2015, 35(12): 4000-4006.
- [3] Kremen C. The value of pollinator species diversity. Science, 2018, 359(6377): 741-742.
- [4] Winfree R, Reilly J R, Bartomeus I, Cariveau D P, Williams N M, Gibbs J. Species turnover promotes the importance of bee diversity for crop pollination at regional scales. Science, 2018, 359(6377): 791-793.
- [5] Garibaldi L A, Steffan-Dewenter I, Winfree R, Aizen M A, Bommarco R, Cunningham S A, Kremen C, Carvalheiro I G, Harder L D, Afik O, Bartomeus I, Benjamin F, Boreux V, Cariveau D, Chacoff N P, Dudenhöfer J H, Freitas B M, Ghazoul J, Greenleaf S, Hipólito J, Holzschuh

- A , Howlett B , Isaacs R , Javorek S K , Kennedy C M , Krewenka K M , Krishnan S , Mandelik Y , Mayfield M M , Motzke I , Munyuli T , Nault B A , Otieno M , Petersen J , Pisanty G , Potts S G , Rader R , Ricketts T H , Rundlöf M , Seymour C L , Schüepp C , Szentgyörgyi H , Taki H , Tscharntke T , Vergara C H , Viana B F , Wanger T C , Westphal C , Williams N , Klein A M. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* , 2013 , 339(6127) : 1608–1611.
- [6] Morse R A , Calderone N W. The value of honey bees as pollinators of U.S. crops in 2000. *Bee Culture* , 2000 , (128) : 1–15.
- [7] Klein A M , Vaissière B E , Cane J H , Steffan—Dewenter I , Cunningham S A , Kremen C , Tscharntke T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B—Biological Sciences* , 2007 , 274(1608) : 303–313.
- [8] Losey J E , Vaughan M. The economic value of ecological services provided by insects. *Bioscience* , 2006 , 56(4) : 311–323.
- [9] 孙翠清 , 赵芝俊. 中国农业对蜜蜂授粉的依赖形势分析——基于依赖蜜蜂授粉作物的种植情况. *中国农学通报* , 2016 , 32(8) : 13–21.
- [10] 安建东 , 陈文锋. 中国水果和蔬菜昆虫授粉的经济价值评估. *昆虫学报* , 2011 , 54(4) : 443–450.