

蜜蜂的生态系统服务功能*

龚志文^{1***} 刘娜^{1**} 张祖芸¹ 柯秋艳¹ 闫振华^{2***}

(1. 红河学院生物科学与农学院, 蒙自 661199; 2. 红河学院发展规划中心, 蒙自 661199)

摘要 蜜蜂在自然界中作为最重要的传粉昆虫之一, 对许多植物种群的稳定和发展壮大、提升经济作物和粮食作物的产量与质量等方面发挥重要作用。蜜蜂的生态系统服务功能在众多生态系统类型和生产生活中均得到了很好的体现, 给人类提供品种多样且营养丰富的蜂产品、自然界中巨大的生态价值、勤劳无私的文化象征、以及给经济作物和农作物增产提质的经济价值等, 对维持生态系统平衡和满足人类需求作出了重要贡献。本文从狭义概念的蜜蜂出发, 全面阐述了以常见且重要的东方蜜蜂 *Apis cerana* 和西方蜜蜂 *Apis mellifera* 为代表的生态系统服务功能的类型和各类型所体现的价值, 并作了简要展望, 以期对蜜蜂的生态系统服务研究提供理论支撑。

关键词 蜜蜂; 生态系统服务功能; 生态系统服务价值; 价值估算

Ecosystem services provided by honeybees

GONG Zhi-Wen^{1***} LIU Na^{1**} ZHANG Zu-Yun¹ KE Qiu-Yan¹ YAN Zhen-Hua^{2***}

(1. College of Biological and Agricultural Sciences, Honghe University, Mengzi 661199, China;

2. Development and Planning Center, Honghe University, Mengzi 661199, China)

Abstract Honeybees are one of the most important pollinating insects in nature, and play an important role in the stability and development of flora, and maintaining the quantity and quality of food and cash crops. Ecosystem services from honeybees are essential to ecosystem function and provide many benefits for humans, including nutrient-rich products and cash-crops. These services make an important contribution to maintaining ecosystems and meeting human needs. This paper reviews the types of ecological services provided by the honeybees *Apis cerana* and *Apis mellifera*, and the value of these services.

Key words honeybee; ecosystem service function; ecosystem service value; value estimation

昆虫作为生态系统中最为重要且数量最为丰富的物种组成部分, 在生态系统中发挥着营养循环、能量流动和信息传递三大功能作用(李博, 2000; 彩万志等, 2001), 对生态系统多样性和生物多样性的维持和保护非常关键。蜜蜂是众多昆虫种类中最为常见的社会性传粉昆虫之一, 虽种属不多, 但因其可为人类提供多种蜂产品, 更因其为自然界中数量庞大的植物种群传粉授粉作出了重大贡献而被人们所熟知。一般而言, 狭

义概念的蜜蜂仅指蜜蜂科的蜜蜂种类, 最为常见且数量众多的便是可人工饲养的东方蜜蜂 *Apis cerana* 和西方蜜蜂 *Apis mellifera*。据统计, 全世界近 70% (约 170 000 种) 显花植物不同程度依赖于蜜蜂授粉, 其中 90% 的果树靠蜜蜂授粉; 约有 40 000 种植物会因为蜜蜂的缺失而繁育困难甚至濒临灭绝(黄凤梅, 2008; Potts *et al.*, 2010)。然而在我国, 专门针对蜜蜂生态服务功能方面缺乏较为系统地阐述。基于此, 着眼于蜜蜂传粉的

*资助项目 Supported projects: 云南省兴滇英才支持计划—青年人才专项项目(XDYC-QNRC-2022-0196); 2021年云南省地方本科高校联合专项资金资助项目(202101BA070 001-074); 2022年云南省教育厅科研基金资助项目(2022J0887); 2022年度红河学院科研基金博士专项项目(XJ22B17)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: gzwen0123@126.com; 410757743@qq.com

***共同通讯作者 Corresponding author, E-mail: gzwen0123@126.com; chivayan@163.com

收稿日期 Received: 2024-04-24; 接受日期 Accepted: 2024-05-31

重要生态学意义,本文拟从以东方蜜蜂和西方蜜蜂为代表的生态系统服务角度出发,全面论述蜜蜂生态系统服务类型和价值及梳理二者之间错

综复杂的联系(图1),并根据现有数据对蜜蜂生态系统服务所带来的价值进行估算,以期对蜜蜂的生态价值有更为系统的认识。

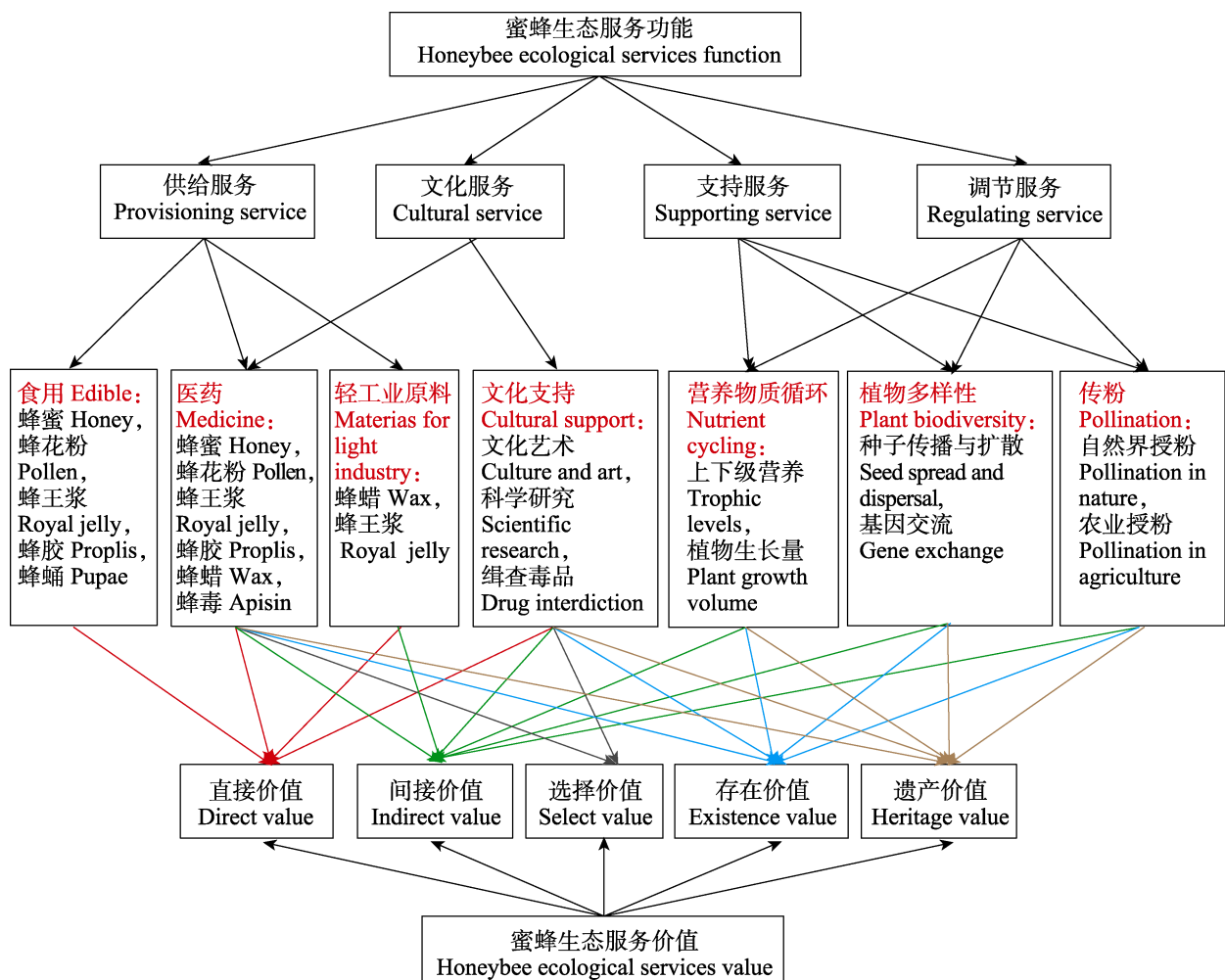


图1 蜜蜂(东方蜜蜂和西方蜜蜂)生态系统服务功能类型与价值类型

Fig. 1 Classifications of honeybee (*Apis cerana* and *Apis mellifera*) ecosystem services and their values

1 蜜蜂生态系统服务功能研究的生态学基础

生态系统服务(Ecosystem service)是指在人类的生产生活过程中,从其生存空间内的各类型生态系统中所获得的包括物品供给、水质净化、气候调控、物质循环等在内的直接收益和间接收益(陈国阶等, 2005; Joseph, 2005; 谢高地, 2006; 张永民, 2007; 张立薇和张红玉, 2015)。生态系统功能(Ecosystem function)是指在实现自然可持续发展的前提下,生态系统可以持续不

断为人类提供商品或服务的自然资源,包括优质的环境、土壤、水、空气、矿物质、林、草和沙等(陈国阶等, 2005; 张立薇和张红玉, 2015)。生态系统服务和生态系统功能属于生态系统服务功能(Ecosystem service function)的两个层面,人类可从生态系统中获得物质基础和相应的服务。随着理论的完善和研究的深入,生态系统的自然属性(功能)与社会属性(服务)在当前已经显现于生态、环境、农业、工业等众多领域的许多绿色发展行业和产业,为人类的生产生活提供供给服务、调节服务、文化服务及支持服务,

从而体现其价值 (Joseph, 2005; 欧阳芳等, 2013)。在倡导生态文明建设的今天, 生态系统服务功能也不断得到有效发挥和持续利用, 为实现美丽中国的愿景添枝加叶。蜜蜂作为自然界和农业生产过程中最重要的传粉昆虫之一, 其生态系统服务功能对自然界和人类文明的发展起了关键作用, 如促进了植物的进化和扩散、保障了人类粮食安全等 (O'Grady, 1987; Gordon and Davis, 2003; 吴杰等, 2004; Allsopp *et al.*, 2008; 罗照亮, 2023)。从全球范围内最近 40 年的监测和统计数据得知, 蜜蜂授粉可给人类和生态环境带来巨大的授粉价值, 同时也为全球生态文明建设提供了诸多惠益, 如提升优质生态产品的产量和质量、提高碳汇储备、保障物种遗传多样性等 (Levin, 1984; Gill, 1989; 吴杰等, 2004; Kasina, 2007; Gallai *et al.*, 2009; 孙颖和卓丽环, 2009; 应博凡和施金虎, 2023)。因此, 蜜蜂的生态系统服务功能所体现的生态价值显而易见。

2 蜜蜂生态系统服务功能的类型

欧阳芳等 (2013) 在对昆虫生态系统服务功能的定义中指出, 昆虫类群在生态系统过程中发挥重要的作用, 并为人类提供有形收益的产品和无形收益的服务。蜜蜂作为重要的传粉昆虫, 为自然界生态系统中众多的植物提供传粉, 为人类提供丰富的蜂产品。蜜蜂还因其勤劳且无私的特质、精灵般的形象为人类提供了良好的精神和文化支撑。因此, 我们可以将蜜蜂生态系统服务功能分为以下四种类型 (图 1)。

2.1 蜜蜂的产品供给服务功能

蜜蜂的产品供给服务功能主要指的是人类从蜜蜂社会活动过程中获取的各类产品, 包括蜂蜜、蜂花粉、蜂王浆、蜂胶、蜂蜡、蜂毒和蜂蛹 (和绍禹, 2005)。

1. 蜂蜜。蜂蜜来自于蜜蜂在为植物授粉过程中从植物花朵内获取的奖励回报, 是蜜蜂社会群体中最为重要的食物。蜂蜜主要成分为葡萄糖和果糖, 为蜂群提供能量。

2. 蜂花粉。蜂花粉是蜜蜂在为植物授粉过

程中从花朵中采集回来的花粉团, 是蜜蜂社会群体中另一种重要的食物。蜂花粉主要成分为蛋白质, 为蜂群提供营养。

3. 蜂王浆。蜂王浆是 5-14 日龄蜜蜂咽下腺 (Hypopharyngeal glands) 和上颚腺 (Mandibular salivary glands) 分泌而来, 专门提供给蜂王与 3 日龄以内幼虫的一种食物, 对蜜蜂个体的发育和蜂王作为可育雌性蜜蜂的功能以及寿命的维持都非常关键, 同时也是蜜蜂级型分化的重要因子之一 (Evans and Wheeler, 1999; Kucharski *et al.*, 2008; Kamakura, 2011)。10-羟基-2-癸烯酸 (10-Hydroxy-2-decenoic Acid, 10-HDA) 是蜂王浆中独有的物质, 具有抗真菌、抗氧化和抗炎活性, 并可作为蜂王浆的质量评价标准 (Çelik *et al.*, 2022)。

4. 蜂胶。蜂胶是蜜蜂采自胶源植物嫩芽等部位分泌的树脂, 经过蜜蜂加工而来, 用于维持蜂群内的温湿度, 也是抵御天敌和病虫害侵扰等的防护剂 (闫继红, 2013)。

5. 蜂蜡。蜂蜡由蜜蜂蜡腺分泌而来, 是酯类、游离酸类、游离醇类和烃类等物质混合而成的黄色固体, 主要用于建造巢房。

6. 蜂毒。蜂毒来自于蜜蜂毒囊, 成分复杂且毒性强, 是主要用于个体和群体间防御以及抵御天敌所使用的防御性物质。

7. 蜂蛹。蜜蜂是全变态发育的昆虫, 一生经历了从卵、幼虫、蛹和成虫共四个发育阶段, 蜂蛹是羽化为成虫前的阶段。蜂蛹因其味道鲜美和营养丰富而被人类利用。

2.2 蜜蜂的生态调节服务功能

蜜蜂的生态调节服务主要是指蜜蜂在从事外界采集活动过程中, 人类因蜜蜂对生态系统的调节过程中所获得的各类收益。其生态调节服务功能主要体现在传粉功能带来的植物多样性。

众所周知, 花的出现无疑是植物进化过程中的一个重大演变, 极大地提升了其在自然界中的地位, 这是植物与传粉者之间协同进化的结果。全球范围内, 85% 的显花植物是需要昆虫授粉的虫媒植物, 其中 68% 的显花植物依靠蜜蜂授粉

(黄凤梅, 2008; Potts *et al.*, 2010), 在热带雨林中 38% 的开花植物完全依赖于蜜蜂授粉(欧阳芳等, 2013)。蜜蜂对植物传粉举足轻重的作用体现在全球范围内的众多植物种类中。蜜蜂传粉确保了众多植物的异花授粉, 很好地维持自然界众多植物的遗传多样性。同时, 蜜蜂为相同植物种群之间进行花粉传播, 会引发许多关键等位基因的相互交流, 促进基因流动, 可进一步增强子代的变异性和适应性, 从而推动该物种种群本身的进化, 产生更多的植物遗传多样性(刘林德等, 1998; Ramanatha Rao and Hodgkin, 2002; 张立微和张红玉, 2015)。蜜蜂为植物提供传粉服务, 使植物能够顺利繁衍, 足见蜜蜂在维持植物种群数量以及植物种群多样性方面的关键作用。

2.3 蜜蜂的文化服务功能

在众多昆虫种类中, 蜜蜂无疑是人们最为熟悉的一种益虫, 蜜蜂的文化服务功能指人们通过精神、认知、思辨、娱乐和美学等层面的体验而获得与蜜蜂相关的非物质收益(欧阳芳等, 2013)。蜜蜂为人类提供的文化服务功能包括精神文化服务和科学研究服务两个方面。

1. 精神文化服务。在百花争艳的春天里, 蜜蜂在花丛忙碌的身影总能出现在人们的视野。“隐居山中无世争, 从此养蜂第一人”, 说的是我国养蜂鼻祖姜岐, 是他开启了人们与蜜蜂更亲密的接触, 影响了后来的蜜蜂文化的形成; “三百天来九州跑, 采得百花成蜜后, 不辞辛苦与君尝”, 这是诗人眼里的蜜蜂; “爱情的甜美如蜂之甘饴”, 这是情人里面的蜜蜂; 《蜜蜂》中法布尔的蜜蜂和《蜜蜂引路》里列宁的蜜蜂, 更是小朋友眼里可爱的大自然精灵。此外, 蜜蜂遇到敌人勇敢搏斗的形象和蜜蜂社会群体齐心协力的形象同样深入人心, 就像富有个性的蜂桶鼓舞承载了布朗族人们的美好生活愿望。因此, 蜜蜂勤劳且无私的特质、精灵般的形象而深受人们喜爱, 千百年来一直是人类世界中名副其实的明星昆虫。

2. 科学研究服务。在很早以前, 人们就观察到蜜蜂的蜂巢结构并惊叹其精巧的设计, 在许多建筑中运用了蜂巢结构设计思路。蜜蜂精密的社会结构、严格的社会等级制度和明确的劳动分

工也受到众多社会学和哲学学者的关注和研究。德国动物学家 Karl von Frisch 因发现蜜蜂的舞蹈而于 1973 年获得诺贝尔奖(Quaglia, 2024), 由此在世界范围内开启了对蜜蜂认知行为学的研究热潮。如今蜜蜂已经成为认知行为学等许多研究领域的模式动物, 如蜜蜂因大脑结构相对简单、神经元数量较少、科研材料容易获取等优势而成为大脑神经科学的理想研究对象(Giurfa, 2007; 郑火青和胡福良, 2009)。此外, 在蜜蜂的应用研究中, 因其具有非常灵敏的嗅觉分辨能力和迅速的反应能力等优势, 通过联想学习训练的蜜蜂能在实际缉查毒品的过程中鉴别出携毒的物品, 提高缉毒工作效率(刘方邻等, 2014; 杨梅和楚红梅, 2023)。

2.4 蜜蜂的支持服务功能

蜜蜂的支持服务功能是指蜜蜂为生产或支撑生态系统功能而发挥的作用(欧阳芳等, 2013)。蜜蜂属于植食性昆虫类型, 以花蜜和花粉为食物来源, 在生态系统中充当能量流动传递者的角色, 将植物中的初级能量进行转化, 同时蜜蜂也处于第二级营养级, 为更高营养层级的动物(如胡蜂或者鸟类)充当食物来源。

蜜蜂是非常重要的传粉昆虫, 对生态系统中植物种群的维持和繁衍扩散具有重要作用, 因此蜜蜂在生态系统中直接或者间接影响着物质循环。例如, 蜜蜂因为传粉而直接影响着生态系统中植物种群的数量和植物的生产量(如果实产量), 间接影响着植物固定太阳能的量、植物为其他植食性动物和分解者(腐食性动物和微生物)提供营养物质的量, 进而影响整个生态系统中的物质循环和能量流动。另外, 蜜蜂传粉增加植物果实的产量和质量也为食果类动物提供营养物质, 还可进一步间接提高植物种子的传播, 从而为生物多样性的维持提供间接贡献。

3 蜜蜂生态系统服务价值体现

蜜蜂之所以深受人们喜爱, 正是因为蜜蜂可为人类提供丰富的蜂产品和高效且满意的服务, 满足人类的很多需求, 具有很高的人类利用价

值。蜜蜂生态系统服务价值可体现为以下 5 种类型(图 1)。由于蜜蜂不同的生态系统服务类型与生态系统服务价值共同指向其生态系统功能而呈现错综复杂的关系,因此在上述生态系统服务类型的基础上,涉及相同服务功能时将从不同的侧重点来描述蜜蜂的生态系统服务价值。

3.1 蜜蜂的直接利用价值

蜜蜂的直接利用价值是指可用产品的市场价格来计算的价值,该类价值主要来自于蜜蜂的供给服务和文化服务两方面的生态系统服务类型,具体体现在四方面。一是蜜蜂产品的价值,如营养价值和医药价值。二是蜜蜂作为传粉昆虫,高效的授粉服务节省了大量的人力物力。三是蜜蜂人文形象具有很高的精神价值,满足人们积极向上的精神需求。四是蜜蜂本身和其产品具有很高的科研价值,可以为医疗卫生、营养健康、环境保护等事业提供提高人们认知的科研材料。

3.2 蜜蜂的间接利用价值

蜜蜂的间接利用价值是指无法商品化的或者无法用直接价值进行衡量的生态系统服务功能,主要包括蜜蜂的生态调节服务和支持服务两方面的生态系统服务类型。具体地讲,蜜蜂的主要间接价值体现在其对生态系统中植物的传粉功能、间接影响着生态系统中的物质循环、能量流动以及种子传播。

3.3 蜜蜂的选择价值

蜜蜂作为重要的传粉昆虫之一,人们为了将来能直接或间接利用蜜蜂生态服务功能的支付意愿而体现出来的价值即为蜜蜂的选择价值。蜜蜂生态系统服务功能的选择价值总体而言主要体现在两方面:一是人们愿意花费大量的人力财力去研究开发蜂产品在医药卫生方面的功效;二是蜜蜂由于大脑神经结构的优势,可为认知行为神经科学研究(如阿尔茨海默病)提供很好的研究模型(Giurfa, 2007; 郑火青和胡福良, 2009)。

3.4 蜜蜂的遗产价值

蜜蜂的遗产价值是指当代人为将来蜜蜂种

质资源保留给子孙后代而自愿支付的费用。任何一个物种在自然界都拥有生存权,人类都应该尊重每一个物种的生存权,在这一生命伦理观的基础上,人类有责任也有义务保护好蜜蜂的种质遗传资源。更重要的是,基于蜜蜂重要的生态地位且在世界范围内均具有丰富的种质遗传资源,人们愿意也应该努力保护好蜜蜂的种质遗传资源,实现蜜蜂资源的可持续发展与利用。

3.5 蜜蜂的存在价值

基于蜜蜂在生态系统中的地位,人们为确保蜜蜂生态系统服务功能能够继续存在而产生的支付意愿所体现出来的价值即为蜜蜂的存在价值。例如,由于蜜蜂在自然界中对环境保护和生物多样性保护的极端重要性,人们愿意花费大量的人力物力和财力来保护蜜蜂的野生种群以维持蜜蜂的种群多样性。

4 蜜蜂生态系统服务功能的价值估算

蜜蜂属于植食性昆虫,同时也是人们熟知的益虫,其生活习性和所产蜂产品对生态系统和人类均大有裨益。蜜蜂在生态系统中所体现出来的服务功能价值主要体现在供给服务价值、传粉服务价值和营养服务价值三个方面。

4.1 蜜蜂的供给服务价值估算

蜜蜂生态服务给人类提供食用、医用、药用、工业用等产品,蜜蜂产品的服务价值可以通过各类产品的产量与对应产品的价值来进行评估。

以我国 2021 年 2 月份蜂蜜、蜂王浆和蜂花粉的出口量数据(中国食品土畜进出口商会·蜂产品分会独家协办, 2021)为例来估算:2 月份蜂蜜出口量为 1.15 万吨,按当时单价 1.85 美元/kg(13.20 元/kg)计算,则蜂蜜出口产值为 1.52 亿元(合约年出口产值近 18.20 亿元);2 月份鲜王浆出口量为 44 380 kg,王浆冻干粉 20 970 kg,按当时的单价 25.38 美元/kg(180.96 元/kg)和 72.59 美元/kg(517.57 元/kg)计算,则 2 月份鲜王浆出口产值为 0.08 亿元(合约年出口产值近 1.00 亿元)、王浆冻干粉出口产值为 0.11 亿

元(约合年出口产值近 1.30 亿元);2 月份蜂花粉出口量为 119 770 kg,按当时的单价 4.72 美元/kg(33.65 元/kg)计算,则 2 月份蜂花粉出口产值为 0.04 亿元(约合年出口产值约 0.50 亿元)。从全年总产量来看,2021 年我国蜂蜜总产量为 47.30 万吨,其中出口占比约为 30%,而蜂产品出口总额为 3.71 亿美元(26.67 亿元),因此,若蜂王浆和蜂花粉也按照此比例计算,则 2021 年我国蜂产品年总产值约 88 亿元。2022 和 2023 年,我国蜂产品出口贸易总额分别为 3.85 亿美元和 3.42 亿美元(折合人民币为 27.68 亿元和 24.45 亿元)(中国食品土畜进出口商会·蜂产品分会独家协办,2022,2023),按照 2021 年出口占比为 30%计算,则我国蜂产品近 2 年年产值分别为 92.27 亿元和 81.5 亿元。因此,纵观近 3 年的行情,每年我国的蜂产品估算价值为 80 亿元-100 亿元,其中出口估算价值为 3 亿-5 亿美元,与 2020 年以前相比,我国蜂产品行业呈现稳中向好的发展趋势。

用于医药产业、食品产业以及化工产业的蜂胶、蜂蜡、蜂蛹和蜂毒,因缺乏相应数据,在此未具体对其产值进行估算。

4.2 蜜蜂传粉服务价值估算

在全球范围内有 75%的农作物依赖于昆虫授粉(黄凤梅,2008),Costanza 等(1997)估算得出全球每年由于传粉服务带来的授粉服务价值大约为 1 170 亿美元,因此说传粉服务在生态系统的服务价值是巨大的。

就蜜蜂而言,传粉服务是其最为重要的生态系统服务功能,是蜜蜂在自然界最重要的价值体现。据统计,在全球范围内有 90%的经济果树依赖于蜜蜂授粉(黄凤梅,2008;Potts *et al.*, 2010)。在 20 世纪 80 年代,蜂类在农业生产过程中,为农作物授粉的价值达到了 189.6 亿美元,超过蜂产品本身价值的 140 倍(Levin, 1984)。Robinson 等(1989)评估 1 000 万美元以内作物依赖蜜蜂授粉的总产值为 93 亿美元,O'Grady(1987)估计蜜蜂为产值在 1 000 万美元以上的作物授粉的价值为 46 亿美元,得益于蜜蜂授粉的价值占

比超过作物总产值的 30%。Gill(1989)的研究发现蜜蜂每年的授粉服务可以为澳大利亚农业获得 6 亿-12 亿澳元的收益。Gallai 等(2009)对 100 种人类直接食用作物进行评估,最终得出这些作物的授粉服务经济价值超过 1 500 亿欧元。Allsopp 等(2008)对南非西开普省的落叶水果产业的授粉服务价值进行了相关的研究,发现饲养蜜蜂授粉的价值为 1.18 亿美元,相当于该省落叶水果产业总产值的 2/3。Kasina(2007)以肯尼亚一个地区为研究点,发现饲养蜜蜂为农作物授粉能够为每户农民每年增收约 1 025 美元。在我国的研究发现,蜜蜂为很多经济作物和农作物的授粉服务价值也很明显,每 667 m² 经济作物可以节省授粉成本 1 000-1 500 元,增加经济作物产量 5%-60%(李建平等,2002;吴杰等,2004;张爱勤等,2005;刘红平等,2008;马玉心和蔡体久,2008;孙颖和卓丽环,2009;罗照亮 2023;应博凡和施金虎,2023)。

反过来,如果说没有蜜蜂进行传粉服务,那么其损失也非常显著。Gordon 和 Davis(2003)的研究发现,没有蜜蜂授粉将会引起澳大利亚的经济损失约 17.26 亿澳元,其农业产值损失约 36.24 亿澳元。Gallai 等(2009)运用生物经济学研究方法研究发现,全球每年由于蜜蜂授粉下降导致的损失约 2 000 亿-3 000 亿欧元。

4.3 蜜蜂的营养服务价值估算

蜜蜂的营养价值主要来自于蜜蜂供给人类可食用的蜂蜜、蜂花粉、蜂王浆和蜂蛹。蜂蜜以葡萄糖和果糖为主要成分,含有少量的矿物质、维生素和微量元素等成分,主要作为人类的能量食品。蜂花粉、蜂王浆和蜂蛹均为高蛋白保健食品,除了丰富的蛋白质以外,还含有少量的矿物质、维生素和微量元素等成分,主要作为人类不可多得的营养保健食品。关于蜜蜂的营养价值服务,可以确定的是,蜜蜂供给服务提供的蜂产品无疑具有很高的营养价值,但因目前尚未对各类蜂产品的营养价值进行准确有效地估算,故无法准确获得蜜蜂的营养服务价值。然而,蜜蜂的营养服务价值所体现的潜在价值是毋庸置疑的,如

因当前的研究水平使蜂王浆和蜂胶潜在的营养价值尚未得到完全开发和利用。

5 小结与展望

在对蜜蜂长期的研究过程中已取得了丰硕的成果,如蜜蜂的供给服务可为人类提供丰富而营养的食物需求,且蜜蜂文化服务可为人类提供多彩的精神享受,蜜蜂授粉对维持我国生态系统平衡和可持续发展起到了重要的作用。我国地域辽阔,生态系统类型多样,蜜蜂种质资源丰富。因此,基于蜜蜂多种多样的生态价值与经济价值,以及蜜蜂生态系统服务功能的重要生态地位,我们应在上述蜜蜂生态系统服务功能的基础上继续研究。可以从以下方面开展后续工作:

1. 提升蜜蜂文化服务功能。在倡导生态文明建设的大背景下,目前对蜜蜂科普知识宣传教育仍显不足,相对滞后于人们对这一主题内容的生态文明教育需求,不利于人们对蜜蜂进行更好的保护和利用。因此,可以多种方式开展蜜蜂科普知识宣传,如增加蜜蜂主题公园、蜜蜂科普博物馆,在中小学开展蜜蜂主题活动和专题讲座,支持蜜蜂科普读物的出版等。另外,可以对蜜蜂科学研究增加支持力度,更深层次开展蜜蜂直接利用价值服务和间接利用价值服务研究,如进一步开发蜂产品的供给服务功能、蜜蜂的医药功能和生态功能等。

2. 提升蜜蜂的生态服务功能评估。当前,我国在蜜蜂对生态系统服务功能的价值体现方面取得了一定的成绩,但总体而言不够完善,很多方面并未深入研究,缺乏有效的价值评估体系,无法准确获取足够的生态数据支持。另外,目前对其他传粉蜜蜂种类如大蜜蜂、小蜜蜂、熊蜂等的生态服务功能评估工作仍处于初步简单了解阶段。因此,若在现有技术基础上,结合人工智能和数字化等现代技术,赋能生物多样性价值评估体系的建立和完善,在全国范围内开展多个蜜蜂生态服务功能的监测,将可以为我国蜜蜂传粉服务价值的研究提供更为充足的数据基础。

3. 提升蜜蜂生物多样性保护。研究发现,近年来我国的野生蜜蜂种群资源不断减少(刘秀

薇等, 2018)。针对这一现状,人们应该思考如何对我国蜜蜂资源的种群多样性和遗传多样性进行全面、准确、高效地编目、监测与评价,不断认识、了解、维持和增强蜜蜂的生态服务功能,才能有效提高我国对蜜蜂资源的保护和利用,人类才能持续稳定地从生态系统中获得蜜蜂所提供的各类收益。

参考文献 (References)

- Allsopp MH, de Lange WJ, Veldtman R, 2008. Valuing insect pollination services with cost of replacement. *PLoS ONE*, 3(9): e3128.
- Cai WZ, Pang FY, Hua BZ, Liang GW, Song DL, 2001. General Entomology. Beijing: China Agricultural University Press. 229–303. [彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 梁广文, 宋敦伦, 2001. 普通昆虫学. 北京: 中国农业大学出版社. 229–303.]
- Çelik S, Gerçek YC, Özkök A, Ecem Bayram N, 2022. Organic acids and their derivatives: Minor components of bee pollen, bee bread, royal jelly and bee venom. *European Food Research and Technology*, 248(12): 3037–3057.
- Chen GJ, He JF, Tu JJ, 2005. A study on the regional disparity of ecological service functions at the Upper Yangtze River Basin. *Journal of Mountain Science*, 23(4): 406–412. [陈国阶, 何锦峰, 徐建军, 2005. 长江上游生态服务功能区域差异研究. 山地学报, 23(4): 406–412.]
- China Chamber of Commerce for Import and Export of Food, Soil and Livestock & Exclusively Co-organized by Bee Products Branch, 2021. Import and export situation of China's main bee products from January to February 2021. *Journal of Bee*, 41(5): 42–49. [中国食品土畜进出口商会·蜂产品分会独家协办, 2021. 我国主要蜂产品 2021 年 1-2 月进出口情况. 蜜蜂杂志, 41(5): 42–49.]
- China Chamber of Commerce for Import and Export of Food, Soil and Livestock & Exclusively Co-organized by Bee Products Branch, 2022. China's cumulative export of bee products reached 385 million dollars, representing a year-on-year growth of 3.77% in 2022. <http://www.cccfna.org.cn/maoyitongji/hangyetongji/ff8080818b809d13018df9207abb4df8.html>. [中国食品土畜进出口商会·蜂产品分会独家协办, 2022. 我国蜂产品累计出口 3.85 亿美元, 同比增长 3.77%. <http://www.cccfna.org.cn/maoyitongji/hangyetongji/ff80808185059a5d01874260151501fe.html>.]
- China Chamber of Commerce for Import and Export of Food, Soil and Livestock & Exclusively Co-organized by Bee Products Branch, 2023. China's cumulative export of bee products reached

- 342 million dollars, a year-on-year decrease of 11.19% in 2023. <http://www.cccfna.org.cn/maoyitongji/hangyetongji/ff8080818b809d13018df9207abb4df8.html>. [中国食品土畜进出口商会·蜂产品分会独家协办, 2023. 年我国蜂产品累计出口 3.42 亿美元, 同比下降 11.19%. <http://www.cccfna.org.cn/maoyitongji/hangyetongji/ff8080818b809d13018df9207abb4df8.html>.]
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, van den Belt M, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630): 253–260.
- Evans JD, Wheeler DE, 1999. Differential gene expression between developing queens and workers in the honey bee, *Apis mellifera*. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 96(10): 5575–5580.
- Gallai N, Salles JM, Settele J, Vaissière BE, 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological Economics*, 68(3): 810–821.
- Gill RA, 1989. An economic evaluation of alternative management practices and enterprise structures in the Australian beekeeping industry. Doctor dissertation. Armidale: University of New England.
- Giurfa M, 2007. Behavioral and neural analysis of associative learning in the honeybee: A taste from the magic well. *Journal of Comparative Physiology a Sensory Neural & Behavioral Physiology*, 193(8): 801–824.
- Gordon J, Davis L, 2003. Valuing honeybee pollination: A report for the rural industries research and development corporation. <http://www.rirdc.gov.au/reports/HBE/03-077.pdf>, (2003-06)/[2023-12-08].
- He SY, 2005. A Guide to Bee Product Awareness. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. 141–164. [和绍禹, 2005. 蜜蜂产品认知大全. 昆明: 云南科技出版社. 141–164.]
- Huang FM, 2008. Honeybee's society. *Forest & Humankind*, 8: 90–95. [黄凤梅, 2008. 蜜蜂社会. 森林与人类, 8: 90–95].
- Joseph A, 2005. Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment. Washington DC, Island Press. 1–245.
- Kamakura M, 2011. Royalactin induces queen differentiation in honeybees. *Nature*, 473(7348): 478–483.
- Kasina JM, 2007. Bee pollinators and economic importance of pollination in crop production: Case of Kakamega, Western Kenya. Doctor dissertation. North Rhine-Westphalia: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Kucharski R, Maleszka J, Foret S, Maleszka R, 2008. Nutritional control of reproductive status in honeybees via DNA methylation. *Science*, 319(5871): 1827–1830.
- Levin MD, 1984. Value of bee pollination to United States agriculture. *Journal of American Bee*, 124: 184–186.
- Li B, 2000. Ecology. Beijing: Higher Education Press. 10–42. [李博, 2000. 生态学. 北京: 高等教育出版社. 10–42.]
- Li JP, Li MH, Yang GH, 2002. Study of pollinating insects and pollinating technical of soybean male sterile plants. *Jilin Agricultural Science*, 27(Suppl): 4–6. [李建平, 李茂海, 杨桂华, 2002. 大豆不育系传粉昆虫及传粉技术研究. 吉林农业科学, 27(增刊): 4–6.]
- Liu FL, Chen XM, Gao J, Deng JL, Xu HY, Li JJ, Zhao GY, Wang YM, Di NY, 2014. Research on automatic training technology of bees in drug detection. Yunnan, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science. [刘方邻, 陈新明, 高洁, 邓建林, 徐宏懿, 李建军, 赵广印, 王有美, 狄纳言, 2014. 蜜蜂在毒品查缉中的自动训练技术研究. 云南省, 中国科学院西双版纳热带植物园.]
- Liu HP, Li HX, Wang XJ, 2008. Pollinating insect species and their foraging behaviors on *Medicago sativa*. *Chinese Journal of Ecology*, 27(5): 780–784. [刘红平, 李晓霞, 王晓娟, 2008. 紫花苜蓿的传粉昆虫种类及其访花行为. 生态学杂志, 27(5): 780–784.]
- Liu LD, Wang ZL, Tian GW, 1998. The pollination biology of *Eleutherococcus senticosus*. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 36(1): 20–28. [刘林德, 王仲礼, 田国伟, 1998. 刺五加传粉生物学研究. 植物分类学报, 36(1): 20–28.]
- Liu XW, Chesters D, Wu CS, Zhou QS, Zhu CD, 2018. A horizon scan of the impacts of environmental change on wild bees in China. *Biodiversity Science*, 26(7): 760–765. [刘秀薇, Douglas Chesters, 武春生, 周青松, 朱朝东, 2018. 环境变化对中国野生蜜蜂多样性的影响. 生物多样性, 26 (7): 760–765.]
- Luo ZL, 2023. Honeybee pollination helps green agriculture: A record of the honeybee pollination industry in Beijing. *Apicultural of China*, 74(6): 36–37. [罗照亮, 2023. 蜜蜂授粉助力绿色农业——记蓬勃发展中的北京市蜜蜂授粉产业. 中国蜂业, 74(6): 36–37.]
- Ma YX, Cai TJ, 2008. An observation on pollinating insects and their flower-visiting behavior on *Pyrola dahurica*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 45(1): 117–122. [马玉心, 蔡体久, 2008. 兴安鹿蹄草传粉昆虫及其访花行为. 昆虫知识, 45(1): 117–122.]
- O'Grady JH, 1987. Market failure in the provision of honeybee pollination: A heuristic investigation. Master dissertation. Vermont: University of Vermont.
- Ou YF, Zhao ZH, Ge F, 2013. Insect ecological services. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 305–310. [欧阳芳, 赵紫华, 戈峰, 2013. 昆虫的生态服务功能. 应用昆虫学报, 50(2): 305–310.]

- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE, 2010. Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(6): 345–353.
- Quaglia S, 2024. Accusations sting bee “odometer” studies. *Science*, 12(6705): 385.
- Ramanatha Rao V, Hodgkin T, 2002. Genetic diversity and conservation and utilization of plant genetic resources. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 68(1): 1–19.
- Robinson WS, Nowogrodzki R, Morse RA, 1989. The value of honey bees as pollinators of U.S. crops. *Journal of American Bee*, 129: 411–423, 477–487.
- Sun Y, Zhuo LH, 2009. Study on pollinating insects of *Agapanthus sifricanus* and their foraging behavior. *Acta Agriculturae Shanghai*, 25(1): 87–91. [孙颖, 卓丽环, 2009. 百子莲的传粉昆虫及其访花行为研究. 上海农业学报, 25(1): 87–91.]
- Wu J, Zhou BF, Peng WJ, An JD, Guo ZB, Tong YM, Li JL, 2004. The research on honeybee pollination techniques in increasing output of lichi (*Lichi chinensis* Sonn) and longan (*Dimocarpus Longan* Lour). *Apicultural of China*, 55(5): 2–3. [吴杰, 周冰峰, 彭文君, 安建东, 国占宝, 童越敏, 李继莲, 2004. 蜜蜂为龙眼、荔枝授粉增产技术的研究, 中国养蜂, 55(5): 2–3.]
- Xie GD, Xiao Y, Lu CX, 2006. Study on ecosystem services: Progress, limitation and basic paradigm. *Journal of Plant Ecology*, 30(2): 191–199. [谢高地, 肖玉, 鲁春霞, 2006. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. 植物生态学报, 30(2): 191–199.]
- Yan JH, 2013. Get to the Bottom of the Propolis. Beijing: Chemical Industry Press. 1–4. [闫继红, 2013. 把蜂胶的事彻底说清楚. 北京: 化学工业出版社. 1–4.]
- Yang M, Chu HM, 2023. American police “bee”. *Modern World Police*, 5: 48–51. [杨梅, 楚红梅, 2023. 美国的多用途警务蜜蜂. 现代世界警察, 5: 48–51.]
- Ying BF, Shi JH, 2023. The superiority of bee pollination. *Zhejiang Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 48(5): 42. [应博凡, 施金虎, 2023. 蜜蜂授粉的优越性. 浙江畜牧兽医杂志, 48(5): 42.]
- Zhang AQ, Tan DY, Zhu JZ, 2005. Analysis on the pollination character and factors limiting the seed yield of alfalfa in pollination. *Pratacutural Science*, 22(11): 40–45. [张爱勤, 谭敦炎, 朱进忠, 2005. 苜蓿传粉特性及其制约种子产量形成的因素分析. 草业科学, 22(11): 40–45.]
- Zhang LW, Zhang HY, 2015. Research progress on ecological functions of pollinator. *Jiangsu Agricultural Science*, 43(7): 9–13. [张立微, 张红玉, 2015. 传粉昆虫生态作用研究进展. 江苏农业科学, 43(7): 9–13.]
- Zheng HQ, Hu FL, 2009. Honeybee: A newly emerged model organism. *Acta Entomologica Sinica*, 52(2): 210–215. [郑火青, 胡福良, 2009. 蜜蜂——新兴的模式生物. 昆虫学报, 52(2): 210–215.]
- Zhang YM, 2007. Ecosystems and Human Well-being: Assessment Framework. Beijing: China Environmental Science Press. 1–262. [张永民, 2007. 生态系统与人类福祉: 评估框架. 北京: 中国环境科学出版社. 1–262.]