

传粉者友好型城市:现状与展望

邹晓春,龚燕兵*

(武汉大学 生命科学学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 传粉者是全球生物多样性资源的重要组成部分,它们在提供重要生态服务的同时,也依赖生态系统中的食物和筑巢资源实现自身生长和繁殖。在全球传粉动物多样性呈下降趋势之际,城市生态系统因具有丰富的花资源和高异质性的栖息地,已成为传粉者的庇护所。综述了城市环境中传粉动物的多样性现状以及影响传粉者多样性的主要因素,最后讨论了保护城市传粉者多样性所需采取的措施,旨在为建设传粉者友好型城市和维护生态平衡提供参考依据。

关键词: 城市生态系统;传粉者;生物多样性;环境变化;资源保护

中图分类号: Q944.43

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2021)06-0597-09

Pollinator-friendly cities: current status and perspectives

ZOU Xiaochun, GONG Yanbing*

(College of Life Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: Pollinators are vital components of terrestrial biodiversity resources, providing important ecological services while also relying on food and nesting resources in the ecosystem for their growth and reproduction. The diversity of pollinating animals is declining worldwide, whereas urban ecosystems have become a refuge for pollinators due to the abundant flower resources and the heterogeneous habitats. In this paper, we review the current status of urban pollinator diversity and its influencing factors. We also discuss effective measures to protect urban pollinator diversity, aiming to provide references for the construction of pollinator-friendly cities and the maintenance of ecological balance.

Key words: urban ecosystem; pollinator; biodiversity; environmental change; resource conservation

0 引言

传粉者是全球生物多样性的重要组成部分,87.5%的开花植物由动物传粉^[1],超过70%的作物依赖以昆虫为主的动物提供传粉服务^[2]。然而,由于生境碎片化、现代农业集约化管理、城市化进程加快和全球气候变化等多种因素的影响,全球传粉者多样性已呈现下降趋势^[3]。例如,2008—2017年间,德国草地上节肢动物丰度减少78%,种类减少34%^[4];1980—2013年之间,英国野生传粉昆虫物种减少达33%^[5]。在全球范围内,农作物所依赖的传粉者消失,将造成每年约1530亿欧元的经济损失^[6]。

自然与农业生态系统,已不再完全是传粉者生存的福地^[7,8]。自然保护区内存在过度放牧和景点开发等问题,这些不合理干扰阻碍植物正常生长发育和繁殖,导致传粉者的食物和筑巢资源减少,传粉者数量和多样性下降。在1989—2016年的27年时间里,德国自然保护区内飞行昆虫生物量减少超过75%^[7]。农业生态系统中传粉者减少的主要原因,一方面是花资源存在短时间集中供应的情况^[9]:一些主要依赖于虫媒实现经济价值的农作物,如蓝莓、西瓜、苹果^[10],因其自然开花时令较短,并不能为传粉者提供全年食物保障。另一方面,高农业效率技术的应用使得单一栽培经济作物得到

收稿日期:2021-03-10 修回日期:2021-03-23 接受日期:2021-05-27

作者简介:邹晓春(1995-),女,硕士生,研究方向为传粉生物学。E-mail: xc_zou@whu.edu.cn

*通讯联系人:龚燕兵(1983-),男,副教授,研究方向为传粉生物学、传粉与花生生态学。E-mail: ybgong@whu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(31970249);深圳市亚热带植物多样性重点实验室开放课题(201912)

引用格式:邹晓春,龚燕兵. 传粉者友好型城市:现状与展望[J]. 生物资源, 2021, 43(6): 597-605.

Zou X C, Gong Y B. Pollinator-friendly cities: current status and perspectives [J]. Biotic Resources, 2021, 43(6): 597-605.

大面积推广,增加了农业生境的同质化^[11],这意味着花资源种类极大减少。此外,田间杀虫剂和除草剂的使用,都对农业生态系统的传粉昆虫产生了负面影响^[12]。

然而,越来越多的证据表明,城市生态系统可以容纳大量的传粉者种群。例如,研究者在柏林记录到了一半的德国蜂群^[13];仅在一个花园中就能记录到英国35%的食蚜蝇^[14]。一方面,由于人工培育^[15]和热岛效应^[16],城市有种类丰富的植物生长,可以全年不间断为传粉者提供花粉和花蜜等食物资源^[17],增加了传粉动物的存活几率。另一方面,城市景观异质性极高,能为传粉者提供花园、草地、保护区等栖息地^[18],以及墙壁、空洞、植物茎干等筑巢点,增加了适于传粉者生存的空间,减少了其种群间竞争。此外,许多城市实施的低杀虫剂政策也可以为维持传粉昆虫多样性创造有利条件^[19]。

全球城市化面积正在不断扩大,早在2008年,全球居住在城市地区的人口比例就已经超过50%,中国改革开放以来城市化率也达到了52.6%。城市已被越来越不利于传粉者生存的农业和半自然景观所包围,也已成为传粉动物的避难所^[20]。因此,城市生态系统作为新兴的传粉者热点地区,其传粉者友好型特征的现状与未来规划不容忽视。

1 传粉者多样性

建设传粉者友好型城市,首先必须对城市传粉动物的种类进行了解。目前已有的城市传粉者多样性研究中,大多数研究对象为蜂类,而其他传粉昆虫类群,如蝇类、蝶类、蛾类、甲虫、鸟类以及一些小型节肢动物,也受到一定关注(表1)^[17,21~34]。

1.1 膜翅目(Hymenoptera)

膜翅目蜂类是世界上最重要的传粉者类群^[35],有研究表明,在调查的105种农作物中,93%的物种得益于膜翅目昆虫传粉^[36]。城市为蜂类提供了丰富多样的栖息地结构、高可用性的植物资源,因此城市野生蜂类的物种丰富度往往高于农业景观^[37]。越来越多的证据表明,野生蜂群存在于世界各地的城市中,例如,在英国的12个城市(Bristol; Cardiff; Swindon; Reading; Greater London; Southampton; Leeds; Sheffield; Kingston upon Hull; Edinburg; Glasgow; Dundee)中都调查到了蜂类传粉者的存在^[38]。城市传粉调查中最受关注的是熊蜂(*Bombus*)和蜜蜂(*Apis*),其次是一些相对丰度较小的蜂类传粉者,如隧蜂(*Halictus*)、无刺蜂(*Trigona*)、榕小蜂(*Agaonidae*)、胡蜂(*Vespidae*)、兰花蜂(*Euglos-*

sini)等。此外,膜翅目蚂蚁(*Formicidae*)在植物传粉过程中也起到一定作用^[39]。蜂类传粉者偏好花粉产量高、花蜜分泌量多的植物^[40]。据笔者个人观察,城市中人工培植的山茶(*Camellia japonica*)、樱花(*Cerasus*),自然生长的蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、猫爪草(*Ranunculus ternatus*)等植物是蜂类传粉者绝佳的食物供给者,同时蜂类传粉者也为城市中的植物提供良好的传粉服务。柏林的一项研究表明,野生蜂的访问次数和挪威枫、欧洲七叶树(*Aesculus hippocastanum*)和刺槐(*Robinia pseudo-acacia*)等城区树木的繁殖成功率呈正相关^[41]。

1.2 双翅目(Diptera)

除蜂类外,最受关注的传粉者类群为双翅目昆虫,在已有传粉研究的105种农作物中,有72%接受双翅目昆虫访问,其中食蚜蝇访问占比约52%^[36]。城市生境中丰富的花资源是蝇类生长繁殖的重要保障,它们提供花蜜作为蝇类的食物来源,提供花粉以保证蝇类卵巢发育所需营养物质^[42]。在多个国家和城市传粉者多样性研究中,双翅目传粉者在数量和丰富度上都能与蜂类比肩^[18,38]。这些双翅目传粉者种类包括食蚜蝇(*Syrphidae*)、丽蝇(*Calliphoridae*)、虻(*Tabanidae*)、蜂虻(*Bombyliidae*)、寄蝇(*Tachinidae*)、果蝇(*Drosophilidae*)、家蚊(*Culicidae*)、摇蚊(*Chironomidae*)等。以花粉为食的蝇类主要是食蚜蝇,而大多数蝇类因其口器适应于液体取食,通常取花蜜为食^[43]。蝇类有先天的颜色偏好,例如,食蚜蝇对黄色有强烈偏好,其他一些蝇类偏好白色等颜色^[44]。有研究者连续三年调查的结果显示,城市中的菊科植物如大吴风草(*Farfugium japonicum*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)等人工培育的品种,拥有大量花粉和花蜜且呈现出相应颜色,极适合作为双翅目昆虫的食物来源。同时,食蚜蝇作为城市里商业草莓的重要传粉者,其访问使草莓年产量增加了70%以上,且畸形更少、糖酸比更低、颜色更浓、浆果重量更重、保质期更长^[45]。

1.3 鳞翅目(Lepidoptera)

鳞翅目作为昆虫纲第二大目^[46],包括蝴蝶和飞蛾两类,均具有重要的传粉作用。在已有的研究中,约54%的农作物接受鳞翅目昆虫访问^[36]。城市常见土地利用类型——道路边缘,是蝴蝶和蛾类的重要栖息地,前者被产蜜植物吸引,后者在高大植被中休息^[47]。研究发现,靠近海岸的花园也具有较高的蛾类丰富度^[48]。城市中最常见的蝶类有粉蝶科(*Pieridae*)、灰蝶科(*Lycaenidae*)、蛱蝶科(*Nymphalidae*)、凤蝶科(*Papilionidae*)等物种,它们多在

表 1 全球城市传粉者多样性代表性研究
Table 1 Representative studies on the world's diversity of urban pollinators

文献 序号	文献名称	国家	城市	传粉者类群
[21]	Urban areas as hotspots for bees and pollination but not a panacea for all insects	德国	Berlin, Braunschweig, Chemnitz, Dresden, Göttingen, Halle, Jena, Leipzig, Potsdam	食蚜蝇, 蜜蜂, 甲虫, 蝴蝶
[22]	Evaluating the effectiveness of wildflower seed mixes for boosting floral diversity and bumblebee and hoverfly abundance in urban areas	英国	Stirlingshire	熊蜂, 食蚜蝇, 蝴蝶
[23]	Pollination and plant reproductive success in restored urban landscapes dominated by a pervasive exotic pollinator	澳大利亚	Sydney	蜜蜂, 蓟马, 甲虫
[24]	Spillover of trap—nesting bees and wasps in an urban-rural interface	德国	Lüneburg	蜜蜂, 胡蜂
[17]	Forest bees are replaced in agricultural and urban landscapes by native species with different phenologies and life-history traits	美国	New Jersey	蜜蜂
[25]	Big city Bombus: using natural history and land-use history to find significant environmental drivers in bumble-bee declines in urban development	美国	Michigan	熊蜂
[26]	Richness, composition and trophic niche of stingless bee assemblages in urban forest remnants	巴西	Belo Horizonte	无刺蜂
[27]	Long-term ecology of orchid bees in an urban forest remnant	巴西	Belo Horizonte	兰花蜂
[28]	Fig wasp dispersal in urban Singapore	新加坡	Singapore	榕小蜂
[29]	Contrasting responses in community structure and phenology of migratory and non-migratory pollinators to urbanization	瑞士	Basel, Biel, Bern, Fribourg, Thun, Luzern, Zurich, Winterthur	食蚜蝇
[30]	Preferences for exotic flowers do not promote urban life in butterflies	法国	All over France	蝴蝶
[31]	Increased body size along urbanization gradients at both community and intraspecific level in macro-moths	比利时	Flemish-Brabant, Brussels	蛾类
[32]	Plant-hummingbird interaction networks in urban areas: Generalization and the importance of trees with specialized flowers as a nectar resource for pollinator conservation	巴西	Uberlândia	蜂鸟
[33]	高山草甸群落内植物与传粉者相互作用的研究	中国	云南	蜂类、蝇类、 蚁类、蝶类、 甲虫、蜂虻
[34]	神农架地区典型草本群落中的昆虫访花行为比较	中国	神农架	鳞翅目、膜翅 目、双翅目

白天活动, 偏好花蜜浓度低、花色艳丽而香味清淡的花朵。一些城市观赏植物, 例如彼岸花 (*Lycoris radiata*), 具备蝶类觅食偏好的所有特征。常见蛾类有天蛾科 (Sphingidae)、尺蛾科 (Geometridae)、夜蛾科 (Noctuidae)、螟蛾科 (Pyralidae) 等物种^[47], 它们的活动时间通常在夜间, 偏好花蜜丰富、花色浅而香味浓的花朵。同时, 鳞翅目昆虫被认为是城市栽培植物的有效传粉者, 它们体型大、通身有绒毛, 在吸食花蜜的同时可大面积接触并携带花粉, 为植物提供传粉服务^[44]。

1.4 其他传粉者

鞘翅目 (Coleoptera) 甲虫被证明是最古老的传粉类群之一^[49]。传粉甲虫进食和栖息都位于花上, 其咀嚼式口器适合取食花粉, 但不利于吸食花蜜。因此, 城市中花朵较大、花粉位置突出、无花蜜分泌的花, 例如七姊妹 (*Rosa multiflora* var. *carnea*), 备受传粉甲虫青睐。我们在武汉大学校园中进行访花实验观察到的常见传粉甲虫有皮蠹 (*Anthrenus*)、隐翅虫 (*Paederus*) 和花蚤 (Mordellidae) 等。由于体型小、通身光滑, 不易携带花粉, 甲虫传粉效率通常较低^[50]。

半翅目 (Hemiptera) 椿象 (Pantatomidae) 也具有

传粉作用,且访问对象主要是菊科、伞形科植物^[49]。城市环岛,特别是面积较大的环岛,支持着数量多且种类丰富的半翅目群落^[51]。在对大戟科血桐属(*Macaranga*)植物进行传粉研究时发现,其雄花和雌花花序上访花最多的是花蝽科(*Anthocoridae*)昆虫,其次是盲蝽科(*Miridae*)昆虫^[52]。此外,长蝽科(*Lygaeidae*)昆虫也具有传粉作用。

缨翅目(*Thysanoptera*)中具有传粉作用的类群为蓟马(*Thripidae*)^[49]。蓟马由于体型极小,可在花苞生长过程中一直存活在花内部,取食花粉和花蜜。城市中的月季花(*Rosa chinensis*)、红花酢浆草(*Oxalis corymbosa*)、愉悦蓼(*Polygonum jucundum*)等植物能为大量的蓟马提供生存环境。但由于蓟马个体小且活动能力低,其传粉能力有限。

鸟类在许多开花植物的传粉过程中发挥着重要作用^[53]。城市中樱花(*Cerasus*)、樟树(*Cinnamomum*)、枇杷(*Eriobotrya*)等树木,几乎可以一年四季为鸟类提供花粉、果实等食物资源。此外,高大乔木枝条繁密,也极适合作为鸟类的栖息地。城市传粉鸟类主要有蜂鸟(*Trochilidae*)、白头鹎(*Pycnonotus sinensis*)、暗绿绣眼鸟(*Zosterops japonicus*)等。鸟类不仅能为植物传递花粉,还能为其传播种子,增加植物繁殖成功率,扩大植物分布范围。

2 影响传粉者多样性的因素

过去的一些研究表明,影响传粉者丰度和多样性的因素包括城市化程度、斑块化程度、花资源供给、气候变化和生存环境等^[3]。这些因素中,虽然有一些使得传粉者受到威胁,却也有一些作为城市生态系统的独特优势,为传粉者提供生存保障。

2.1 景观尺度影响因素

2.1.1 硬化面积对城市传粉者多样性的影响

在城市环境中,影响传粉者的主要因素之一是景观尺度上的土地硬化面积。硬化面积比例从0.06%到64.31%的城市环境对蜂类群落构建的研究证明,景观尺度上硬化面积的比例是驱动蜂类群落构建的关键因素^[54];城市硬化面积对传粉者种类和数量均有负面影响^[55]。硬化表面的出现使得城市中的栖息地碎片化严重,传粉者运动因此减少,随之而来的是传粉者生殖隔离^[56]。此外,硬化面积的增加使得原本的植物生存面积减少,从而导致传粉者生存资源减少。然而,硬化建设使得城市斑块化程度增加,城市管理者为适应不同的斑块特征,种植大量的观赏性开花植物,这可以带来丰富的食物和筑巢资源,进而容纳较高的传粉者多样性^[22]。

2.1.2 土地利用类型对城市传粉者多样性的影响

过去的研究提出土地利用变化导致的栖息地丧失是传粉者减少的罪魁祸首^[57]。然而,并非所有土地利用类型都对传粉者不利。对英国4个城市的9种土地利用类型(社区农圃、花园、墓地、建筑物、城市自然保护区、其他绿地、公园、道路、路边)共360个样地的系统调查发现,城市中的不同土地使用类型对传粉者丰度和多样性有不同水平的影响^[18]。社区农圃和花园所包含的植物资源以及传粉者丰度和多样性都显著高于其他土地利用类型,墓地和人工绿地也可通过增加花资源的途径实现对传粉者的大量容纳。

2.2 绿地资源影响因素

2.2.1 食物资源对城市传粉者多样性的影响

传粉者的生存和繁殖依赖季节性的食物资源供给,传粉者目前面临的多种威胁中,植物花资源不足是关键因素之一^[8]。研究者对英格兰和威尔士花蜜资源的世纪性调查发现,花蜜资源在20世纪30年代到70年代之间大量减少,传粉者多样性在此期间同样呈下降趋势^[58]。然而,城市里的树木可以为传粉动物提供重要的食物资源,包括花粉、花蜜、分泌物等。植物资源增加对传粉者多样性和传粉服务以及传粉者群落构建均有积极的影响^[20]。群居蜜蜂在整个蜂群活动期间(大约从4月到9月)都需要大量的花蜜和花粉,花朵数量和质量都会影响到群居蜜蜂的营养摄入^[59]。为改善城市绿地景观,城市管理者种植越来越多的观赏性树木,它们能在一年中的不同时期提供不同的食物资源,确保城市传粉者拥有充足的季节性食物来源。发现城市乔木花蜜丰富且含糖量较高(每朵花含蜜量达0.16~1.28 mg);挪威枫(*A. pseudoplatanus*)、刺槐(*R. pseudoacacia*)等植物的花粉中含有大量多肽、氨基酸和甾醇,均可作为传粉者提供特定的营养保障^[60]。

2.2.2 筑巢资源对城市传粉者多样性的影响

适宜的筑巢栖息地是传粉者生存和繁殖的另一必要条件。城市高度斑块化的环境使得传粉者栖息地具有高异质性,花园、草坪等绿地成为昆虫的生存福地^[61];土壤、墙壁和其他结构上已存在的空洞,还有植物茎干和树枝,都可以为各种各样的传粉者提供合适的筑巢地点;一些鸟类还可以在篱笆护栏上筑巢^[62]。此外,不同的传粉动物因其生活习性的不同,筑巢高度也有所不同,例如,大多数鸟类在树上利用树杈建造窝巢;马蜂通常将巢穴建在二十几米的树上,蜜蜂巢穴则相对较矮;蝶类则喜欢栖息在树叶上。城市绿化植物高低组合有序,充分满足了城市传粉者对于筑巢资源的需求。

2.3 非生物影响因素

2.3.1 气候变暖对城市传粉者多样性的影响

城市硬化表面吸收并重新辐射太阳光,造成城市比周围的自然地区温暖,这种现象被称为城市热岛效应^[63]。城市变暖对昆虫的生理机能、适应度和丰度均有一定影响。成年蜜蜂越冬后,生理适应性降低,这可能是因为温暖的冬季,蜜蜂滞育期间新陈代谢增加,这种提早发育使得蜜蜂自身耐受性降低^[64]。此外,在温暖的条件下,蜜蜂的滞育期从10~15天延长至59天以上,从而错过大量春季的花资源,导致种群繁殖能力下降^[65]。且有研究发现城市气温每升高1℃,蜜蜂数量就减少41%^[66]。

2.3.2 光污染对城市传粉者多样性的影响

光污染在城市环境中广泛存在,并在过去几十年里以每年6%的速度在全球范围内增长^[67]。夜间人造光对生物多样性的影响极大,仅一座灯塔就能使鸟类死亡率增加10~40倍^[68]。全球夜间人造光的快速增加也已对夜间传粉昆虫造成威胁,如破坏昆虫的繁殖过程和昼伏夜出昆虫的生活习性^[69]。有研究报告几十年来,在光污染程度高的城市地区,与原始种群相比,来自城市的飞蛾种群避光行为显著减少,这可能导致其灼伤或增加其暴露于捕食者的几率^[70]。此外,城市光污染还包括白亮污染,即建筑物的玻璃墙面、釉面砖瓦、磨光大理石面等装饰反射的太阳光^[71]。这种光污染会破坏植物的生物钟节律,对植物休眠和花芽形成造成影响,从而导致植物生长繁殖受阻,使传粉者所需植物资源减少。

2.3.3 重金属离子对城市传粉者多样性的影响

城市中冶炼厂附近的污染场地有高浓度的重金属离子(Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等),这导致传粉者数量显著减少^[72]。某些十字花科植物因富集重金属离子,花粉和花蜜中均含有硒元素,蜜蜂幼虫对食物中的硒非常敏感,尽管硒浓度低至0.72 mg/kg,它们也会表现出高死亡率和发育效应;成年蜜蜂也会因摄入硒而遭受致命威胁^[73]。

2.3.4 农药使用对城市传粉者多样性的影响

农药在城市环境中常用来杀死害虫、病菌和杂草。然而,许多农药(包括杀虫剂、杀菌剂和除草剂)都会伤害传粉昆虫和其他有益昆虫。农药使用会减少昆虫所需的植物资源,还会通过与昆虫的直接接触或以植物为媒介的间接接触,对昆虫繁殖、导航和记忆造成微妙的影响。对法国私人花园里的研究表明,蝴蝶和熊蜂的丰度与杀虫剂和除草剂的使用量呈负相关^[74]。

3 对策与展望

随着世界继续快速变化和城市化程度加剧,需要采取合理措施来改善城市环境,使城市容纳更多传粉者。综合城市生态系统中传粉者丰度和多样性发生改变的驱动因素,建设传粉者友好型城市需要从以下几点出发。

3.1 合理规划景观配置

随着世界各地城市的迅速扩张,最大限度地减少城市化对当地生物多样性的负面影响需要实施最佳的城市化发展形式。城市扩张有两种形式:土地节约和土地共享。在土地节约政策下,生物多样性基本上集中在一个或几个大型绿地中;而在土地共享政策下,生物多样性分布于整个景观,但处于碎片化的绿地中^[75]。因此,城市扩张形式的合理选择对城市传粉者生存有着至关重要的影响。研究人员量化了日本东京土地共享和土地节约两种开发形式下,蝴蝶和甲虫的相对保护效益,结果证明在更高的城市化水平(景观中建筑物数量更高)下,土地节约导致了这两个类群中大多数物种的总种群规模更高;在较低的城市化水平,土地共享的情况下蝴蝶数量更大^[76]。

在实施城市扩张时,估算绿地面积通常要考虑相应绿地的质量。在城市中,社区农圃因可自由种植开花观赏植物和开花蔬果而可容纳更丰富的传粉者,而公园因花资源量少且单一,不利于传粉者生存^[18]。道路、建筑物等硬化表面对城市传粉者多样性和传粉服务也有负面影响^[56]。因此,城市管理者应合理分配不同土地类型占比,以最大限度维持城市传粉者多样性。在公共管理绿地和私家花园中,可增加蒲公英和白车轴草等长花期植物的丰度,使传粉者丰度随之增加。还有人提出通过安装绿色屋顶^[77]或在墙壁或道路边增设花篮或者花坛,以弥补硬化表面比例增加对传粉者的负面影响。

3.2 优化绿地资源管理

前人研究表明,作为传粉者食物的花资源供给量,与传粉者的丰度和多样性休戚相关^[78]。草坪同社区农圃、花园一样,都有能力作为传粉者的避难所^[22]。但受到美学和社会规范的驱使,城市坚持有序、无杂草、郁郁葱葱的绿草地管理,通常投入大量时间和资金进行草坪修剪。然而降低城市草坪修剪强度可以使城市绿地中开花植物和访花昆虫的数量显著增加^[79]。例如,每3周一次割草的花丰度是每周割草一次的2.5倍^[80];不割草比在春夏两季每周割草一次的花数量和传粉者数量要多3~5倍^[61]。

对纽约住宅花园中蜜蜂数量的研究表明,频繁修剪草坪和施用除草剂会耗尽传粉者的花资源^[81]。此外,草坪被频繁修剪使其所具有的栖息地潜力下降,还有研究表明减少草坪修剪可增加植被高度,从而改善蝴蝶和飞蛾的栖息地需求^[82]。

此外,城市生态系统中,因园艺观赏需求,许多人工培育的植物出现花朵鲜艳、气味芳香但花药瓣化或花蜜分泌减少甚至不分泌等情况。例如,人工培育的无蜜距旱金莲属(*Tropaeolum*)、重瓣万寿菊属(*Tagetes*)、长蜜距堇菜属(*Viola*)等植物,因花报酬产量减少或可获得性降低,前来访问的昆虫数量和种类均显著少于原始品种^[83]。传粉者会因原有植物资源减少而不能摄取充足的营养,从而影响自身生长和繁殖。为保证城市传粉者食物资源的质量,人工培育新的观赏品种时应确保花药和蜜腺的正常发育。

3.3 降低非生物因素影响

随着城市化建设,室外灯光布置不应只追求明亮,还应考虑“人工白昼”对生物行为产生的潜在威胁。人们已认识到光污染对生物个体甚至生态系统的影响,并呼吁减少路灯密度和开启时间^[84]。然而,长期暴露于光污染的传粉者已形成适应性生存方式,例如蛾类不仅种群数量降低,还改变了种群通讯位置和互作频率^[85]。即当灯都关掉时,光污染对自然种群的影响不会立即消失。因此,还需防止光污染扩散到迄今未受影响的地区。此外,可推广使用密闭式固定光源,减少光线发射至光源平面以上的区域,保留一定的黑暗天空,以保证飞行昆虫的正常生存。

另外,提倡并践行绿色出行方式,节能减排,以减缓全球气候变暖进程;城市工厂运行的同时做好科学的“三废”处理;城市绿化管理以生物物理方法代替化学方法,例如,用天敌代替杀虫剂、用人工拔除代替除草剂等等,都是建设传粉者友好型城市的有效办法。

在全球传粉昆虫数量减少的情况下,城市地区,尤其是中等程度的城市化地区,具有保护传粉昆虫多样性的巨大潜力。因此,在这个日益以人类为主导的世界里,将生物多样性保护和生态系统服务融入城市景观规划和实践中,对生态可持续发展极为重要。如今,城市居民与自然的联系日益疏远,城市自然保护项目也可以帮助人们重新认识人与自然的平等地位,总体上提高人类的环境保护与和谐发展意识^[86]。

参考文献

[1] Ollerton J, Winfree R, Tarrant S. How many flower-

ing plants are pollinated by animals? [J]. *Oikos*, 2011, 120(3): 321-326.

- [2] Kleijn D, Winfree R, Bartomeus I, *et al.* Delivery of crop pollination services is an insufficient argument for wild pollinator conservation [J]. *Nat Commun*, 2015, 6: 7414.
- [3] Potts S G, Biesmeijer J C, Kremen C, *et al.* Global pollinator declines: trends, impacts and drivers [J]. *Trends Ecol Evol*, 2010, 25(6): 345-353.
- [4] Seibold S, Gossner M M, Simons N K, *et al.* Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers [J]. *Nature*, 2019, 574(7780): 671-674.
- [5] Powney G D, Carvell C, Edwards M, *et al.* Widespread losses of pollinating insects in Britain [J]. *Nat Commun*, 2019, 10: 1018.
- [6] Gallai N, Salles J M, Settele J, *et al.* Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline [J]. *Ecol Econ*, 2009, 68(3): 810-821.
- [7] Hallmann C A, Sorg M, Jongejans E, *et al.* More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0185809.
- [8] 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.
- [9] Kremen C, Williams N M, Aizen M A, *et al.* Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change [J]. *Ecol Lett*, 2007, 10(4): 299-314.
- [10] Klein A M, Vaissière B E, Cane J H, *et al.* Importance of pollinators in changing landscapes for world crops [J]. *Proc Biol Sci*, 2007, 274(1608): 303-313.
- [11] Ollerton J, Erenler H, Edwards M, *et al.* Pollinator declines. Extinctions of aculeate pollinators in Britain and the role of large-scale agricultural changes [J]. *Science*, 2014, 346(6215): 1360-1362.
- [12] Whitehorn P R, O'Connor S, Wackers F L, *et al.* Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production [J]. *Science*, 2012, 336(6079): 351-352.
- [13] Saure C. Urban habitats for bees: the example of the city of Berlin [C]. New York: Linnean Society Symposium Series, 1996: 47-53.
- [14] Owen J. Wildlife of a garden: a thirty-year study [C]// Royal Horticultural Society. London: Royal horticultural Society, 2010: 184-188.

- [15] Corbet S A, Bee J, Dasmahapatra K, *et al.* Native or exotic? double or single? evaluating plants for pollinator-friendly gardens [J]. *Ann Bot*, 2001, 87(2): 219-232.
- [16] Youngsteadt E, Dale A G, Terando A J, *et al.* Do cities simulate climate change? A comparison of herbivore response to urban and global warming [J]. *Glob Chang Biol*, 2015, 21(1): 97-105.
- [17] Harrison T, Gibbs J, Winfree R. Forest bees are replaced in agricultural and urban landscapes by native species with different phenologies and life-history traits [J]. *Glob Chang Biol*, 2018, 24(1): 287-296.
- [18] Baldock K C R, Goddard M A, Hicks D M, *et al.* A systems approach reveals urban pollinator hotspots and conservation opportunities [J]. *Nat Ecol Evol*, 2019, 3(3): 363-373.
- [19] Fortel L, Henry M, Guilbaud L, *et al.* Decreasing abundance, increasing diversity and changing structure of the wild bee community (Hymenoptera: Anthophila) along an urbanization gradient [J]. *PLoS One*, 2014, 9(8): e104679.
- [20] Hall D M, Camilo G R, Tonietto R K, *et al.* The city as a refuge for insect pollinators [J]. *Conserv Biol*, 2017, 31(1): 24-29.
- [21] Theodorou P, Radzevičiūtė R, Lentendu G, *et al.* Urban areas as hotspots for bees and pollination but not a panacea for all insects [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 576.
- [22] Blackmore L M, Goulson D. Evaluating the effectiveness of wildflower seed mixes for boosting floral diversity and bumblebee and hoverfly abundance in urban areas [J]. *Insect Conserv Divers*, 2014, 7(5): 480-484.
- [23] Lomov B, Keith D A, Hochuli D F. Pollination and plant reproductive success in restored urban landscapes dominated by a pervasive exotic pollinator [J]. *Landsc Urban Plan*, 2010, 96(4): 232-239.
- [24] Pereira-Peixoto M H, Pufal G, Martins C F, *et al.* Spillover of trap-nesting bees and wasps in an urban-rural interface [J]. *J Insect Conserv*, 2014, 18(5): 815-826.
- [25] Glaum P, Simao M C, Vaidya C, *et al.* Big city *Bombus*: using natural history and land-use history to find significant environmental drivers in bumble-bee declines in urban development [J]. *R Soc Open Sci*, 2017, 4(5): 170156.
- [26] Antonini Y, Martins R P, Aguiar L M, *et al.* Richness, composition and trophic niche of stingless bee assemblages in urban forest remnants [J]. *Urban Ecosyst*, 2013, 16(3): 527-541.
- [27] Nemésio A, Santos L M, Vasconcelos H L. Long-term ecology of orchid bees in an urban forest remnant [J]. *Apidologie*, 2015, 46(3): 359-368.
- [28] Jeevanandam N, Corlett R T. Fig wasp dispersal in urban Singapore [J]. *Raffles Bull Zool*, 2013, 61(1): 343-347.
- [29] Luder K, Knop E, Menz M H M. Contrasting responses in community structure and phenology of migratory and non-migratory pollinators to urbanization [J]. *Divers Distributions*, 2018, 24(7): 919-927.
- [30] Bergerot B, Fontaine B, de Renard M, *et al.* Preferences for exotic flowers do not promote urban life in butterflies [J]. *Landsc Urban Plan*, 2010, 96(2): 98-107.
- [31] Merckx T, Kaiser A, van Dyck H. Increased body size along urbanization gradients at both community and intraspecific level in macro-moths [J]. *Glob Chang Biol*, 2018, 24(8): 3837-3848.
- [32] Maruyama P K, Bonizário C, Marcon A P, *et al.* Plant-hummingbird interaction networks in urban areas: generalization and the importance of trees with specialized flowers as a nectar resource for pollinator conservation [J]. *Biol Conserv*, 2019, 230: 187-194.
- [33] 龚燕兵. 高山草甸群落内植物与传粉者相互作用的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- Gong Y B. A community-level study on plant-pollinator interactions in an alpine meadow [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [34] 杜巍, 王红侠, 汪小凡. 神农架地区典型草本群落中的昆虫访花行为比较[J]. *生物多样性*, 2007, 15(6): 666-672.
- Du W, Wang H X, Wang X F. Insect visitors and their behaviors in the typical herbaceous plant communities of the Shennongjia Mountains [J]. *Biodiversity Science*, 15(6): 666-672.
- [35] Ollerton J. Pollinator diversity: distribution, ecological function, and conservation [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2017, 48(1): 353-376.
- [36] Rader R, Cunningham S A, Howlett B G, *et al.* Non-bee insects as visitors and pollinators of crops: biology, ecology, and management [J]. *Annu Rev Entomol*, 2020, 65: 391-407.
- [37] Turrini T, Knop E. A landscape ecology approach identifies important drivers of urban biodiversity [J]. *Glob Chang Biol*, 2015, 21(4): 1652-1667.
- [38] Baldock K C R, Goddard M A, Hicks D M, *et al.* Where is the UK's pollinator biodiversity? The importance of urban areas for flower-visiting insects [J]. *Proc R Soc B*, 2015, 282(1803): 20142849.
- [39] Gong Y B, Huang S Q. Floral symmetry: pollinator-mediated stabilizing selection on flower size in bilateral species [J]. *Proc Biol Sci*, 2009, 276(1675): 4013-4020.

- [40] 张伟, 何承斌, 龚燕兵. 鸢尾属植物的传粉者吸引及异交策略[J]. 植物科学学报, 2019, 37(5): 672-681.
Zhang W, He C B, Gong Y B. Pollinator attraction and outcrossing strategies in *Iris* [J]. Plant Sci J, 2019, 37(5): 672-681.
- [41] Hausmann S L, Petermann J S, Rolff J. Wild bees as pollinators of city trees [J]. Insect Conserv Divers, 2016, 9(2): 97-107.
- [42] Doyle T, Hawkes W L S, Massy R, *et al.* Pollination by hoverflies in the Anthropocene [J]. Proc Biol Sci, 2020, 287(1927): 20200508.
- [43] Krenn H W, Plant J D, Szucsich N U. Mouthparts of flower-visiting insects [J]. Arthropod Struct Dev, 2005, 34(1): 1-40.
- [44] Fægri K, van der Pijl L. Applied pollination ecology [M]//Principles of Pollination Ecology. Amsterdam: Elsevier, 1979: 159-163.
- [45] Hodgkiss D, Brown M J F, Fountain M T. Syrphine hoverflies are effective pollinators of commercial strawberry [J]. J Pollinat Ecol, 2018, 22: 55-66.
- [46] 刘凌云, 郑光美. 普通动物学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1997.
Liu L Y, Zheng G M. General Zoology [M]. (3rd ed.), Beijing: Higher Education Press, 1997.
- [47] Saarinen K, Valtonen A, Jantunen J, *et al.* Butterflies and diurnal moths along road verges: does road type affect diversity and abundance? [J]. Biol Conserv, 2005, 123(3): 403-412.
- [48] Bates A J, Sadler J P, Grundy D, *et al.* Garden and landscape-scale correlates of moths of differing conservation status: significant effects of urbanization and habitat diversity [J]. PLoS One, 2014, 9(1): e86925.
- [49] 龚燕兵, 黄双全. 传粉昆虫行为的研究方法探讨[J]. 生物多样性, 2007, 15(6): 576-583.
Gong Y B, Huang S Q. On methodology of foraging behavior of pollinating insects [J]. Biodivers Sci, 2007, 15(6): 576-583.
- [50] Kendall D A, Solomon M E. Quantities of pollen on the bodies of insects visiting apple blossom [J]. J Appl Ecol, 1973, 10(2): 627.
- [51] Helden A J, Leather S R. Biodiversity on urban roundabouts-Hemiptera, management and the species-area relationship [J]. Basic Appl Ecol, 2004, 5(4): 367-377.
- [52] Ishida C, Kono M, Sakai S. A new pollination system: brood-site pollination by flower bugs in *Macaranga* (Euphorbiaceae) [J]. Ann Bot, 2009, 103(1): 39-44.
- [53] Mendonça L B, Anjos L D. Bird-flower interactions in Brazil: a review [J]. Rev Bras Ornitol Braz J Ornithol, 2003, 11(19): 195-205.
- [54] Geslin B, Le Féon V, Folschweiller M, *et al.* The proportion of impervious surfaces at the landscape scale structures wild bee assemblages in a densely populated region [J]. Ecol Evol, 2016, 6(18): 6599-6615.
- [55] Burdine J D, McCluney K E. Interactive effects of urbanization and local habitat characteristics influence bee communities and flower visitation rates [J]. Oecologia, 2019, 190(4): 715-723.
- [56] Winfree R, Bartomeus I, Cariveau D P. Native pollinators in anthropogenic habitats [J]. Annu Rev Ecol Evol Syst, 2011, 42(1): 1-22.
- [57] Harrison T, Winfree R. Urban drivers of plant-pollinator interactions [J]. Funct Ecol, 2015, 29(7): 879-888.
- [58] Baude M, Kunin W E, Boatman N D, *et al.* Historical nectar assessment reveals the fall and rise of floral resources in Britain [J]. Nature, 2016, 530(7588): 85-88.
- [59] Goulson D, Peat J, Stout J C, *et al.* Can alloethism in workers of the bumblebee, *Bombus terrestris*, be explained in terms of foraging efficiency? [J]. Animal Behav, 2002, 64(1): 123-130.
- [60] Somme L, Moquet L, Quinet M, *et al.* Food in a row: urban trees offer valuable floral resources to pollinating insects [J]. Urban Ecosyst, 2016, 19(3): 1149-1161.
- [61] Garbuzov M, Fensome K A, Ratnieks F L W. Public approval plus more wildlife: twin benefits of reduced mowing of amenity grass in a suburban public park in Saltdean, UK [J]. Insect Conserv Divers, 2015, 8(2): 107-119.
- [62] Neame L A, Griswold T, Elle E. Pollinator nesting guilds respond differently to urban habitat fragmentation in an oak-savannah ecosystem [J]. Insect Conserv Divers, 2013, 6(1): 57-66.
- [63] Yuan F, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in landsat imagery [J]. Remote Sens Environ, 2007, 106(3): 375-386.
- [64] Fründ J, Dormann C F, Holzschuh A, *et al.* Bee diversity effects on pollination depend on functional complementarity and niche shifts [J]. Ecology, 2013, 94(9): 2042-2054.
- [65] CaraDonna P J, Cunningham J L, Iler A M. Experimental warming in the field delays phenology and reduces body mass, fat content and survival: implications for the persistence of a pollinator under climate change [J]. Funct Ecol, 2018, 32(10): 2345-2356.
- [66] Hamblin A L, Youngsteadt E, Frank S D. Wild bee abundance declines with urban warming, regardless of floral density [J]. Urban Ecosyst, 2018, 21(3): 419-428.
- [67] Hölker F, Wolter C, Perkin E K, *et al.* Light pollution

- as a biodiversity threat [J]. *Trends Ecol Evol*, 2010, 25 (12): 681-682.
- [68] Jones J, Francis C M. The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses [J]. *J Avian Biol*, 2003, 34(4): 328-333.
- [69] MacGregor C J, Pocock M J O, Fox R, *et al.* Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant [J]. *Ecosphere*, 2019, 10(1): e02550.
- [70] Altermatt F, Ebert D. Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution [J]. *Biol Lett*, 2016, 12(4): 20160111.
- [71] 玉子. 白亮污染——光污染系列之一[J]. *家庭医学*, 2005(18): 57-58.
Yu Z. Brightness pollution, series number one of light pollution [J]. *Family Medicine*, 2005(18): 57-58.
- [72] Moroń D, Grześ I M, Skórka P, *et al.* Abundance and diversity of wild bees along gradients of heavy metal pollution [J]. *J Appl Ecol*, 2012, 49(1): 118-125.
- [73] Hladun K R, Parker D R, Trumble J T. Cadmium, copper, and lead accumulation and bioconcentration in the vegetative and reproductive organs of *Raphanus sativus*: implications for plant performance and pollination [J]. *J Chem Ecol*, 2015, 41(4): 386-395.
- [74] Muratet A, Fontaine B. Contrasting impacts of pesticides on butterflies and bumblebees in private gardens in France [J]. *Biol Conserv*, 2015, 182: 148-154.
- [75] Fischer J, Fazey I, Briese R, *et al.* Making the matrix matter: challenges in Australian grazing landscapes [J]. *Biodivers Conserv*, 2005, 14(3): 561-578.
- [76] Soga M, Yamaura Y, Koike S, *et al.* Land sharing vs. land sparing: does the compact city reconcile urban development and biodiversity conservation? [J]. *J Appl Ecol*, 2014, 51(5): 1378-1386.
- [77] Colla S R, Willis E, Packer L. Can green roofs provide habitat for urban bees (Hymenoptera: Apidae)? [J]. *Cities Environ*, 2009, 2(1): 1-12.
- [78] Hennig E I, Ghazoul J. Pollinating animals in the urban environment [J]. *Urban Ecosyst*, 2012, 15(1): 149-166.
- [79] Unterweger P A, Wastian L, Betz O. Influence of the reduction of urban lawn mowing on wild bee diversity (Hymenoptera, Apoidea) [J]. *J Hymenoptera Res*, 2016, 49: 51-63.
- [80] Lerman S B, Contosta A R, Milam J, *et al.* To mow or to mow less: lawn mowing frequency affects bee abundance and diversity in suburban yards [J]. *Biol Conserv*, 2018, 221: 160-174.
- [81] Fetridge E D, Ascher J S, Langellotto G A. The bee fauna of residential gardens in a suburb of New York City (Hymenoptera: Apoidea) [J]. *Ann Entomol Soc Am*, 2008, 101(6): 1067-1077.
- [82] Giuliano W M, Accamando A K, McAdams E J. Lepidoptera-habitat relationships in urban parks [J]. *Urban Ecosyst*, 2004, 7(4): 361-370.
- [83] Comba L, Corbet S A, Barron A, *et al.* Garden flowers: insect visits and the floral reward of horticulturally-modified variants [J]. *Ann Bot*, 1999, 83(1): 73-86.
- [84] Longcore T, Rich C. Ecological light pollution [J]. *Front Ecol Environ*, 2004, 2(4): 191-198.
- [85] MacGregor C J, Pocock M J, Fox R, *et al.* Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review [J]. *Ecol Entomol*, 2015, 40(3): 187-198.
- [86] Cumming G S, Buerkert A, Hoffmann E M, *et al.* Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services [J]. *Nature*, 2014, 515(7525): 50-57.

□

(编辑: 梅楠 张丽红)