

刘芝若, 尹豪. 城市森林建设背景下天敌保护型林地研究 [J]. 风景园林, 2022, 29 (9) : 113-120.

城市森林建设背景下天敌保护型林地研究

Research on Woodlands for Conservation of Natural Enemies in View of Urban Forest Construction

刘芝若 尹豪*

LIU Zhiruo, YIN Hao*



中图分类号: S718.52

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022)09-0113-08

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.09.0113.08

收稿日期: 2021-03-10

修回日期: 2022-07-13

刘芝若 / 女 / 北京林业大学园林学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计、城乡人居环境

LIU Zhiruo is a Ph.D. candidate in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Her research focuses on landscape planning and design, and ecological environment of urban and rural human settlements.

尹豪 / 男 / 博士 / 北京林业大学园林学院教授 / 城乡生态环境北京实验室成员 / 本刊特约编辑 / 研究方向为风景园林规划与设计、植物景观规划与设计

通信作者邮箱 (Corresponding author Email): yinhao@bjfu.edu.cn

YIN Hao, Ph.D., is a professor in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, a member of Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, and a contributing editor of this journal. His research focuses on landscape planning and design, and plant landscape planning and design.

摘要: 远郊平原林地作为城市森林建设的一部分, 由于承载着丰富庞大的生物量和复杂的群落结构, 成为农业害虫天敌理想的栖息场所, 构建天敌保护型林地对农业害虫的生态调控和实现生态系统的可持续发展具有重要意义。基于国内外文献研究, 以天敌保护型林地作为综述对象, 梳理总结了林地与天敌栖息的关系, 分析出林地在树种配置、群落结构和空间格局 3 个方面对天敌栖息的影响机制, 并从 4 个层面提出合理配置及优化布局的天敌保护型林地营建策略, 即营建异龄复层混交林、提升食源植物的比例、营建巢穴庇护空间和增强景观格局异质性, 从而构建适宜天敌栖息的多样化林地环境, 增强天敌的生态控害保益功能, 以期实现城市森林功能的拓展、生物多样性的维持及生态服务功能的提升。

关键词: 生物多样性; 生物防治; 栖息地营建; 城市森林; 天敌保护型林地

基金项目: 北京林业大学热点追踪项目 (编号 2022BLRD05); 北京市共建项目 (编号 2019GJ-03)

Abstract: As a part of urban forest construction, the exurban plain woodlands have become an ideal habitat for natural enemies of agricultural pests because of their abundant biomass and complex community structure. The construction of woodlands for conservation of natural enemies is of great significance to the ecological regulation of agricultural pests and sustainable ecosystem development. Based on the research of domestic and foreign literature, this research, taking woodlands for conservation of natural enemies as the object of review, summarizes the relationship between woodlands and the inhabitation of natural enemies, analyzes the influencing mechanism of woodlands on the inhabitation of natural enemies in the three aspects of tree species configuration, community structure and spatial pattern, and proposes relevant construction strategies that can achieve rational configuration and layout optimization of woodlands for conservation of natural enemies from the following four dimensions: planting mixed forests of different ages, increasing the proportion of food source plants, building nest shelters, and enhancing the heterogeneity of landscape patterns. In this way, the research builds a diversified woodland environment suitable for the inhabitation of natural enemies that can enhance the function of natural enemies in controlling the harm to and protecting the benefits of the ecosystem, in hope of expanding urban forest functions, maintaining biodiversity and improving ecological service functions.

Keywords: biodiversity; biological control; habitat construction; urban forest; woodlands for conservation of natural enemies

Fund Items: Hotspot Tracking Project of Beijing Forestry University (No. 2022BLRD05); Beijing Joint Construction Project (No. 2019GJ-03)

城市森林是中国推进城乡生态建设、拓展绿色生态空间的一项重要国家战略。促进乡村生态宜居环境和林田相依的生态空间建设, 实现城乡居民生态福利均衡化, 形成鸟语花香、林荫掩映、生物多样的健康森林, 是营建长寿

稳定、功能多样的森林景观的重要方面。与城市森林中远郊平原林地主要交界的农田, 是中国乡村面域最大的生产空间, 因长期强调作物产量, 不仅造成农业景观单一、化学药物污染等传统环境问题, 还会引起农业生态系统服务

表1 常见农业害虫及其天敌种类^[22-29]
Tab. 1 Species of common agricultural pests and their natural enemies^[22-29]

农田类型	常见农业害虫	对应天敌	
		寄生性天敌	捕食性天敌
大豆田	大豆食心虫 (<i>Leguminivora glycinivorella</i>)、朱砂叶螨 (<i>Tetranychus cinnabarinus</i>)、小地老虎 (<i>Agrotis ypsilon</i>)、豆蚜 (<i>Aphis craccivora</i>)、大豆蚜 (<i>Aphis glycines</i>)	澳洲赤眼蜂 (<i>Trichogramma confusum</i>)、白足蚜小蜂 (<i>Aphelinus albipodus</i>)	中华草蛉 (<i>Chrysoperla sinica</i>)、七星瓢虫 (<i>Coccinella septempunctata</i>)、异色瓢虫 (<i>Harmonia axyridis</i>)、多异瓢虫 (<i>Hippodamia variegata</i>)、大灰食蚜蝇 (<i>Syrphus corollae</i>)、灰喜鹊、麻雀 (<i>Passer</i>)
水稻田	稻纵卷叶螟 (<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>)、水稻负泥虫 (<i>Oulema oryzae</i>)、三化螟 (<i>Scirpophaga incertulas</i>)、二化螟 (<i>Chilo suppressalis</i>)、大稻弄蝶 (<i>Pelopida sassamensis</i>)	稻螟赤眼蜂 (<i>Trichogramma japonicum</i>)、紫黑长角沼蝇 (<i>Sepedon sphegeus</i>)、稻苞虫黑瘤姬蜂 (<i>Coccygomimus parnae</i>)、纵卷叶螟长体茧蜂 (<i>Macrocentrus cnaphalocrocis</i>)、燕麦蚜茧蜂 (<i>Aphidius avenae</i>)	黑卷尾 (<i>Dicrurus macrocercus</i>)、黑肩绿盲蝽 (<i>Cyrtorrhinus livdipennis</i>)、东亚小花蝽 (<i>Orius sauteri</i>)
花生田	斜纹夜蛾 (<i>Prodenia litura</i>)、朱砂叶螨、棉铃虫 (<i>Helicoverpa armigera</i>)、小地老虎	夜蛾瘦姬蜂 (<i>Ophion luteus</i>)	瓢虫类、大草蛉 (<i>Chrysopa pallens</i>)、红脚隼 (<i>Falco vespertinus</i>)、戴胜、大山雀
小麦田	麦二叉蚜 (<i>Schizaphis graminum</i>)、麦红吸浆虫 (<i>Sitodiplosis mosellana</i>)、麦长管蚜 (<i>Sitobion avenae</i>)、麦长腿蜘蛛 (<i>Petrobia latens</i>)	粘虫悬茧蜂 (<i>Meteorus gyrator</i>)、麦蚜茧蜂 (<i>Ephedrus plagiator</i>)、烟蚜茧蜂 (<i>Aphidius gifuensis</i>)、短翅蚜小蜂 (<i>Aphelinus asychis</i>)	黑带食蚜蝇 (<i>Episyrphus balteatus</i>)、瓢虫类、灰喜鹊、戴胜、黑卷尾、大山雀
玉米田	棉铃虫、亚洲玉米螟 (<i>Ostrinia furnacalis</i>)、玉米蚜 (<i>Rhopalosiphum maidis</i>)	腰带长体茧蜂 (<i>Macrocentrus cingulum</i>)、玉米螟厉寄蝇 (<i>Lydella griseascens</i>)	食蚜瘦蚊 (<i>Aphidoletes aphidimyza</i>)、瓢虫类、蜘蛛类、草蛉类、灰喜鹊、戴胜

功能下降和退化，如通过生态调控手段控制害虫数量功能的失效^[5]。农业害虫天敌在生物控害和维护农业安全问题上发挥着重要作用^[6-8]。据统计，捕食性和寄生性天敌昆虫在农田害虫调控中发挥了50%以上的作用^[9-10]，创造的控害价值占重要作物总经济价值的9.09%^[11]。作物—害虫—天敌形成的食物网维持着农业生态系统的平衡与稳定。因此，提高天敌局部丰度和现有控害效力来进行保育生物防治^[12]对于天敌保护具有很强的必要性。

保护栖息地是保护动物最直接有效的方式，已有多位学者的研究表明农田周边的非作物生境，如树林、灌木篱墙、草地等，可为天敌提供蜜粉源食物以及适宜的避难和越冬场所^[13-16]，也是构成城市森林中林田相依格局的重要元素。其中林地受人类活动影响较小，以其丰富的生物量和复杂的植被群落结构，成为天敌栖息的主要场所。且林地丰富的物种资源增加了种间关系和功能结构的复杂性，进而提升生态系统稳定性和可持续性^[2]，天敌也因此能够更加快速、高效地发挥控害

作用。2018年北京市人民政府印发《北京市新一轮百万亩造林绿化行动计划》，规定坚持生态优先，为鸟类等动物迁徙、栖息提供生境，维护生物多样性和绿色生态廊道的完整性^[17]；2020年北京市园林绿化局印发《北京森林城市发展规划（2018年—2035年）》，也提出平原生态林地要提供长期稳定的多样化生物生境，促进森林生态系统的健康稳定^[18]，以上政策和规划文件皆体现出国家针对林地生态功能和生物多样性提升的方向转变。但目前，就林地对于天敌栖息的影响机制仍然缺乏探讨，对如何营造适宜天敌栖息的林地条件以最大化发挥天敌保护效应的策略仍然缺乏系统梳理，如何推动林地建设由数量增长向质量提升转变、发挥林地的生态服务功能仍是亟待解决的问题。因此，以适宜天敌栖息为出发点，建设天敌保护型林地，正成为风景园林行业面临的新兴热点。

本研究一方面认识到林地以其特有的生态环境条件，对于天敌栖息具有重要的意义，需深入研究林地环境要素与天敌栖息的生态关

系；另一方面，提出相关营建策略与措施建议，以维持和增强林地在天敌保护上的作用。为此，本研究以天敌保护型林地作为综述对象，分析林地对天敌保护的机制，进而提出基于天敌栖息的林地营建策略，以期促进城市森林生态功能的发挥与可持续发展，也是提升远郊平原林地生物丰富度和生态系统稳定度的重要手段。

1 林地对天敌保护的意義

1.1 常见天敌物种

农业害虫的天敌分为捕食性天敌和寄生性天敌^[19]。其中，草蛉类 (*Chrysopidae*)、瓢虫类 (*Coccinellidae*)、蜘蛛类 (*Araneida*) 以及寄生蜂类是天敌节肢动物中的优势种群；天敌鸟类位于农业生态链上端，对某种或某几种害虫具有持久的控制和优先调控能力^[20-21]，常见的有灰喜鹊 (*Cyanopica cyana*)、戴胜 (*Upupa epops*)、大山雀 (*Parus major*) 等 (表1)，在天敌栖息环境保护的研究中具有代表性。

天敌自身具备较强的环境适应能力，能在空间层面上与害虫建立相似的群落，在数量层面上与害虫保持同样的生长趋势，实现捕食或寄生关系的跟随^[30]。捕食性天敌的迁徙能力较强，倾向选择食源丰富、对其发育繁殖有利的林地栖息^[31]。天敌节肢动物如步甲类 (*Carabidae*) 趋向于在林地和农田边界处生存，便于其越夏和越冬^[32-33]；蜘蛛在土壤较湿润、植被生长良好的林地环境中数量较多^[34-36]；农田周围分布有大面积的林地，有利于瓢虫迁入麦田，且瓢虫丰富度与周围林地生境比例呈正相关^[37-39]。天敌鸟类如大山雀喜爱在山麓或村庄附近的树林中生活；戴胜多停留在田野和树干上觅食，主要捕食半翅目如蚜虫等农业害虫，并营巢于树洞或墙洞内^[40]。寄生性天敌也是重要的生态调节因子和生态控害资源^[41]，栖息地异质性增加或林地结构复杂都有利于其生存繁衍^[42-43]，且林地所占比例越高，寄生性天敌的种群数量及其寄生作用也相应越高。

1.2 林地对天敌的保护作用

远郊平原林地以其丰富的植被组成和群落结构，为天敌提供充裕的食物资源和理想的筑巢条件，成为天敌重要的资源库、种群

维持区域和重要庇护所,且不同类型的林地对于天敌具有不同的保护作用。1)块状林地面积最大,植被丰富,结构复杂,由上而下完整的乔-灌-草层次可以为天敌提供替代生境及逃避不良环境条件的生存空间,不同生态位的天敌皆可在此找到适宜的栖息场所,这提高了天敌的生存率和多样性,进而增强该区域的生物防治效果,提高农业系统抵御环境变化的应对能力和生态系统的弹性调节能力^[44];2)线性林地可以提高林地与其他生境斑块之间的连接度和连通性,降低天敌交流、迁徙和分布的阻力,促进天敌之间的信息交流,为天敌提供更大选择范围的栖息地和生存空间,以维持生物群体自身的生态习性与遗传交换能力^[45-46];3)农田边缘林带作为农田交界的缓冲区,林缘线蜿蜒曲折,且与农田或其他生境的交界面很长,有利于天敌在生境斑块之间的迁徙扩散以及生物种群的繁衍和扩大^[47-48]。比如,当相邻农田害虫爆发成灾时,天敌能够通过延长的农林交界面,迅速扩散到农田中发挥生物控害的功能;4)分散在田间地头的树木尽管规模不大且零碎,但也可以成为天敌临时停留栖息的场所^[49-50],作为其迁徙路上的脚踏石,与林带廊道一同连接起各林地斑块,构成完整的农林生态网络,以提供养分循环、传粉、害虫控制等生态服务来促进农业可持续生产。由于林地具有适宜天敌栖息的优势资源和条件,故本研究提出构建天敌保护型林地,在远郊平原林地景观建设要求的基础上,最大化发挥林地的天敌保护和生态调节效应。

2 天敌保护型林地的作用机制

林地作为生物潜在的资源库,合理的树种配置、丰富的群落结构以及多样的空间格局皆对天敌栖息具有积极影响。林地组成结构的多样性促进了物质的能量流动和信息传递,加强了生态系统的稳定性与恢复力,而稳定的林地环境反过来会更加利于天敌栖息和食物网连接,形成良性生态循环与正反馈机制。

2.1 树种配置

不同的树种可以凭借自身特性为天敌栖息提供食物来源及庇护空间,树种类型、植

被盖度、枝干属性都会影响天敌对其栖息部位的选择。

2.1.1 树种类型

目前林地建设多选用速生树种,树种单一,相对于混生的自然林,生物多样性维持水平较低^[51]。而有研究表明,树种类型及其丰富程度是影响天敌数量和多样性的重要因素^[52-53],所以针阔混交林中的天敌数量要比纯林多^[54]。尤其是天敌鸟类栖息,需要有一定的针叶林覆盖比例,因为在冬季,针叶林可以为越冬天敌鸟类提供食物和隐蔽空间^[55]。菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、豆科(Leguminosae)、蔷薇科(Rosaceae)等蜜源植物在作物生长或收割后,可以为天敌提供替代食物,保证其生存。有些植物自身会挥发一些特殊化学物质,招引农田害虫同期取食这些植物,是天敌的食源储备库。如香根草(*Chrysopogon zizanioides*)能产生挥发性物质吸引二化螟,且茎叶含有毒性物质使二化螟幼虫丧失解毒代谢能力而死亡,同时香根草可作为水稻螟虫的天敌寄生蜂如赤眼蜂(*Trichogramma*)、大螟黑卵蜂(*Telenomus sesamiae*)等的培育圃,能够提高天敌数量和控害能力,强化对水稻螟虫的生物防控效果^[56]。

2.1.2 植被盖度

植被盖度大,透光率小,会使得林下环境低温、高湿且昼夜温差较小,比较适宜天敌节肢动物栖息^[57]。且天敌节肢动物大多体积小、飞行距离短,在寻求蜜源植物或庇护场所时,需要借助冠层上方的空气流动,迎风飞到植物旁进行取食或停留,植物盖度越大,就决定了其飞行距离越短,越有利于其到达栖息地。天敌鸟类栖息筑巢大多都依赖植物,它们倾向选择具有高大树冠的乔木、植株高且群落种植密度大的隐蔽环境营巢^[58]。

2.1.3 枝干属性

植株枝干的不同属性也会影响天敌对栖息场所的选择。树皮粗糙且呈纵向开裂、裂缝长而深的乔木较树皮光滑、裂缝小而浅的乔木更能吸引天敌节肢动物前来栖息。这是由于部分天敌成虫在交配后的繁殖阶段会将虫卵注入树干中,粗糙的树皮是天敌节肢动物及其幼卵良好的庇护场所;而树皮光滑、表

面具有蜡质、材质坚硬的健壮树体,天敌节肢动物不易附着产卵。此外,和林带下层树干相比,天敌节肢动物更倾向在聚集更多害虫的嫩枝萌条上停留,这是由于下层树干的的食物资源较少,而萌条木质化程度低,幼嫩的新根、新叶能吸引更多害虫取食,天敌数量也会相应增多^[59]。

2.2 群落结构

除了树种配置,林地的年龄组成和垂直结构,是形成林地多样空间层次和功能组成的主要因子,也会对天敌栖息产生重要影响。

2.2.1 年龄组成

一般来说,幼、中龄林的植株紧密低矮、树冠宽大,生物隐蔽条件好;成熟林的植株郁闭度高,林木生长缓慢,土壤有机质较多,植被群落和生物栖息皆趋于稳定。因此,异龄的林地结构更加复杂,冠层数多,天敌栖息程度也相应越高。

2.2.2 垂直结构

具备完整垂直结构(从地面到树冠包括地表层、草本层、灌木层和乔木层)且植被群落种类丰富的林地,生态结构复杂稳定,相较纯林更加健康、适应性更强^[39,60-61]。各层植物在不同的空间位置上具有不同的空间结构,形成多样的微环境,相应地造成天敌种类和数量在垂直结构层面存在差异。在草本层和灌木层中,环境复杂,有很多灌木丛分布,其间的草本植物长势也较好,覆盖度较大,植物种类较乔木层丰富,且草本层和灌木层在林下的位置分布多样,如有的位于林下遮阴部位,有的位于林冠间隙,加上较为湿润的土壤和较高的空气湿度,具备适宜多种天敌节肢动物生存的环境条件;而在乔木层中,高大及茂密的枝条能为天敌鸟类提供隐蔽的夜栖和营巢环境,所结果实与种子可以为天敌鸟类提供取食层等多种营养生态位^[62-63]。因此,木本、草本植物的合理搭配可以营造丰富异龄的群落垂直结构,不仅能够反映林木间的竞争态势及其空间生态位,也决定着天敌鸟类、天敌节肢动物及植物层的三维空间,体现了林分的稳定性、生物多样性及天敌栖息潜力。

2.3 空间格局

分布在远郊平原的林地与农田、草地、

树篱和道路等组成多元镶嵌体^[64]，适度的景观组成异质性有利于天敌发挥控害潜能^[65-66]。大部分在农业上有重要防治作用的天敌，出于生存的考虑，需要在作物和非作物生境之间迁徙或移动^[67-69]。例如，寄生蜂和食蚜蝇类(Syrphidae)需要农田害虫作为它们幼虫的寄主，而成虫则需要取食植物的花粉或花蜜以增加它们的寿命和生殖潜力。因此对林地及其他生境进行整体性的空间格局管理，包括面积比例和分布格局，可以促进不同生境界面的天敌迁徙与交流。

2.3.1 面积比例

一般来说，随着非作物生境比例的增加，天敌数量呈先上升后下降的趋势^[14, 70]，其中20%普遍被认为是一个临界点，即非作物生境面积比例达20%左右最有利于天敌生存^[71-72]，对农业害虫防治最为有利。国际生物防治组织(International Organisation for Biological Control, IOBC)建议农田生态系统中半自然生境用地占比不要低于5%^[73]，当其接近15%时，林地作为半自然生境的重要组成部分，能较好地发挥对天敌的保护作用^[74]。这是因为林地受人干扰较少，稳定性更强，当人们进行除草、施肥及收割等耕作行为时会导致农田生境受到强烈人工扰动，此时天敌可以迁徙至农田周边的林地中躲避；同时林地内也分布着较多动植物，可以为天敌提供充足的食物源^[75-76]，且林地地表覆盖了枯枝落叶及草本植物，形成了林地地表的湿润环境，满足蜘蛛、步甲、蠹蛾类(Labiduridae)等大部分天敌所倾向的温暖、潮湿及隐蔽性较好的生活环境^[14]。

2.3.2 分布格局

天敌因追随优质食源空间，会随季节变化改变自身对栖息生境的选择趋向。当作物进入生长旺季，农田中作物害虫大量出现，为天敌提供了更为丰沛优质的食源，天敌便不断从林地迁入农田；当作物秋收之后，农田空旷裸露，但林地环境依旧复杂稳定，和农田相比，其食源较为充沛，天敌又重新迁回至林地，将其作为越冬前的主要栖息觅食场所，从而出现天敌随季节更迭在林地与农田之间来回迁徙的现象^[34, 39, 77]。林地作为天敌的重要资源斑块，其利用效率取决于天敌扩散能力以

及邻近作物属性，而合理的分布格局则可以降低天敌迁徙或干扰阻力，提高控害效率。

1) 林地分布与天敌扩散能力。许多天敌节肢动物的扩散能力有限，如膜翅目体积较小，需要借助气流才能进行远距离飞行，如果扩散能力小于其到达可利用资源的距离，则会影响它们在农田中建立有效的种群，它们的寄主或猎物就会失去天敌的控制，从而对作物造成危害^[78-79]。当林地以破碎化的小生境斑块散布于作物景观中时，边缘密度和接触界面较大，天敌扩散能力的限制作用会被弱化^[80]，天敌就比较容易进入作物生境进行控害。且由于天敌节肢动物在林地生境内部的迁徙能力和资源利用效率也有限，所以林地斑块尺度不宜过大。经研究，成年瓢虫在直径1.8~2.0 km、蜘蛛在直径2.0~6.0 km、寄生性天敌昆虫在直径为1.5 km的景观尺度下分布最多^[81]。

2) 林地分布与邻近作物属性。对于短周期的一年生作物，由于收获和耕作等农事活动，作物受到干扰的频率和强度较强，不适于天敌稳定、长久的栖息，而广泛分布其间的林地小斑块可以发挥脚踏石的作用，有助于天敌快速进入农田捕食害虫以及在遇到干扰时及时迁出；对于多年生作物，其周边则需要大面积的林地生境来帮助天敌避难或越冬^[82]。同时，可通过林带廊道良好的连通性与农田紧密相连，保证天敌的迁徙活动顺畅。

3 天敌保护型林地营建策略

综上，林地中丰富的树种配置、复杂的群落结构和多样的空间格局是天敌栖息与交流的良好场所。因此，本研究从4个层面提出天敌保护型林地营建策略，有助于打造空间和功能复合的林地系统，发挥和扩散连续完整的生态格局效用，是从注重森林面积增加向注重森林生态系统结构优化和营造多种生物生境转变的重要表现，也是进一步完善林相风貌、形成鸟语花香的远郊平原近自然生态林地景观效果的重要手段。

3.1 营建异龄复层混交林

3.1.1 针阔混交

林地结构中多树种、多层次的混交林

最适于多样的动物栖息^[83]。因为林地树木种类增多，植食性害虫和微生物种类也会增多，相应地捕食性天敌和中间寄主的数量也会因得到正向反馈而增多，容易达到生物间依赖和制约的动态平衡，有助于增强林地系统的稳定性。因此天敌保护型林地的主要建群种不可单一，应遵循优势种、乡土树种优先的原则，选择株型饱满、植株高大且易于天敌筑巢的树种。例如，华北地区可选用小叶杨(*Populus simonii*)、小青杨(*Populus pseudosimonii*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等作为优势树种，再搭配榆树(*Ulmus pumila*)、垂柳(*Salix babylonica*)、枫树(*Acer* spp.)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)等辅佐树种，营建针阔叶混交林，且针叶林比例不低于30%，以满足天敌冬季的庇护需求；对于乔木层混交比例，大规模乔木(上层乔木)与小规格乔木(下层乔木或亚乔木)混交比例为2:3^[17]。

3.1.2 异龄均衡

一般来讲，幼、中龄植株低矮，树冠延展大，适于天敌节肢动物隐蔽；成熟林植株高大挺拔，树冠荫浓，适于天敌鸟类栖息。一片理想均衡的异龄林需要保证一定的栽植密度，林分直径结构趋于1.3~1.7，表明林木株数分布合理。林地树木的平均胸高断面面积超过12 m²/hm²，能够发挥生态栖息效应^[84]。但栽植过密会加剧种内及种间对光照、水分等生存资源的竞争，影响下层林木生长质量，无法为天敌节肢动物提供良好的生存条件，且乔木冠层过于浓密也会令天敌鸟类没有停留落脚的空间。因此均衡搭配不同树龄的树木，可以满足多种生态位的天敌栖息需求。

3.1.3 复层结构

林层指数是描述林层多样性和复杂度的因子，指数越接近1，表明林分垂直方向层数越复杂，空间异质性越高^[85]。乔-灌-草结构层次越完整、植被群落越丰富的复层混交林地，环境次级结构的多样性越高，越能为天敌提供更多繁殖和隐蔽的空间。

因此，要加大乡土树种、多年龄层乔木混合种植，同时可在高大乔木的不同位置辅

助设立动物巢箱,为天敌鸟类的繁衍营造适合的筑巢地点^[86];局部开林窗,便于天敌鸟类停留栖息,冠层会透有光线,使得林下更新稳定,同时保留一定的枯立木和倒木,便于天敌节肢动物繁衍栖息。灌木层中水平延展的枝叶会给天敌提供良好的庇护空间,因此营造不同密度、不同高度结合的复层灌丛,灌丛的光照、水热条件越好,能够吸引更多天敌节肢动物和小型天敌鸟类在此隐蔽栖息;草本层以乡土花草地被为主,种类多样、密度较高,但郁闭度较低,温湿度适中,很适合天敌节肢动物隐避、栖息、繁殖及其幼虫的生存,同时生活在草本植物上的害虫也可成为天敌节肢动物的替代食物资源。

3.1.4 人工抚育

林分紧凑、郁闭度高的完整林地由于植物种间存在竞争关系,使得林内透光率、透雨量不足,林地中下层植被功能群多样性降低。且结构紧密、侧根发达的林地树木会对边缘农田作物产生胁迫效应,影响农业生产和生态平衡。

因此,要对林地定期进行人工抚育,疏散上层冠层结构,林下植被可以获得更好的光照和水分条件,进而维持较高的灌、草植被生物量和生长质量,比完整性林地更适宜天敌生存^[87],同时经过人工抚育后的林地,树冠透风、透光度提升,减少了对周边农田作物的遮阴作用,有利于改善小气候。此外,为了减轻林地胁迫效应的影响,可以在林地两侧挖沟,沟深40~50 cm、沟宽30~50 cm,以截断林带向农田内延伸的树木根系,使林地植物不与作物争夺水分和养分^[88],且浅沟还有利于天敌节肢动物潜伏栖息。

3.2 提升食源植物的比例

食源植物的种类和数量会对天敌栖息产生重要影响。原因在于天敌鸟类多于3、4月取食植物花叶,11、12月取食植物果实^[89-91],此时作物分别处于萌芽生长和收割后的时期,田间害虫不多,食源植物可作为替代食物保证天敌的生存。到了冬季食物匮乏的时期,有些天敌鸟类随之会去取食体积较小、挂果时间较长的坚果类植物^[92],如圆柏(*Juniperus chinensis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松

表2 天敌常见食源植物种类^[91, 93-94]
Tab. 2 Species of common food source plants for natural enemies^[91, 93-94]

结构层	常见食源植物	吸引天敌种类
乔木层	坚果类: 圆柏、侧柏、油松、美国红栎(<i>Fraxinus pennsylvanica</i>)、杜仲(<i>Eucommia ulmoides</i>)、槐(<i>Styphnolobium japonicum</i>)、紫薇(<i>Lagerstroemia indica</i>)、红皮云杉、胡桃(<i>Juglans regia</i>)等	灰喜鹊、红脚隼、戴胜、黑卷尾等
	浆果类: 柿树、枣树、山杏(<i>Prunus sibirica</i>)、山桃(<i>Prunus davidiana</i>)、杜梨(<i>Pyrus betulifolia</i>)、越橘(<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)、山楂(<i>Crataegus pinnatifida</i>)、紫叶李(<i>Prunus cerasifera</i> 'Atropurpurea')等	灰喜鹊、大山雀、麻雀、黑卷尾、草蛉等
	花类: 榆树、白花泡桐、毛白杨(<i>Populus tomentosa</i>)、加杨(<i>Populus × canadensis</i>)、茶条槭(<i>Acer tataricum</i> subsp. <i>ginnala</i>)、暴马丁香(<i>Syringa reticulata</i> subsp. <i>amurensis</i>)、毛泡桐(<i>Paulownia tomentosa</i>)等	灰喜鹊、麻雀、黑卷尾等
灌木层	叶芽类: 刺槐、榆树、毛白杨、银杏(<i>Ginkgo biloba</i>)、旱柳(<i>Salix matsudana</i>)等	灰喜鹊、红脚隼、戴胜、麻雀、黑卷尾等
	牡荆(<i>Vitex negundo</i>)、紫穗槐、连翘、酸枣、荆条、野蔷薇(<i>Rosa multiflora</i>)、卫矛(<i>Euonymus alatus</i>)等	灰喜鹊、红脚隼、戴胜、麻雀、黑卷尾、寄生蜂等
草本层	林下生境: 延龄草(<i>Trillium tschonoskii</i>)、葎草(<i>Arthraxon hispidus</i>)、败酱(<i>Patrinia scabiosifolia</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、牛皮消(<i>Cynanchum auriculatum</i>)、鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>)、苣荬草(<i>Arthraxon hispidus</i>)、菎草(<i>Humulus scandens</i>)、茜草(<i>Rubia cordifolia</i>)、狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>)、紫菀(<i>Aster tataricus</i>)、虎尾草(<i>Chloris virgata</i>)、香丝草(<i>Erigeron bonariensis</i>)、醴肠(<i>Eclipta prostrata</i>)、刺儿菜(<i>Cirsium arvense</i> var. <i>integrifolium</i>)、委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i>)、一年蓬、蓬子菜(<i>Galium verum</i>)、苜蓿等	蜘蛛、草蛉、瓢虫、食蚜蝇、寄生蜂等
	道路生境: 鸭茅(<i>Dactylis glomerata</i>)、绒毛草(<i>Holcus lanatus</i>)、梯牧草(<i>Phleum pratense</i>)、针茅(<i>Stipa capillata</i>)、大花马齿苋(<i>Portulaca grandiflora</i>)、益母草(<i>Leonurus japonicus</i>)、曼陀罗(<i>Datura stramonium</i>)、夏至草(<i>Lagopsis supina</i>)、地黄(<i>Rehmannia glutinosa</i>)、长蕊石头花(<i>Gypsophila oldhamiana</i>)等	步甲、蜘蛛、草蛉、麻雀等
	作物生境: 燕麦(<i>Avena sativa</i>)、荞麦(<i>Fagopyrum esculentum</i>)、稷(<i>Panicum miliaceum</i>)、玉蜀黍(<i>Zea mays</i>)、藜麦(<i>Chenopodium quinoa</i>)、芸薹(<i>Brassica rapa</i> var. <i>oleifera</i>)、野甘蓝(<i>Brassica oleracea</i>)、甜菜(<i>Beta vulgaris</i>)、向日葵(<i>Helianthus annuus</i>)、起绒草(<i>Dipsacus fullonum</i>)、野胡萝卜(<i>Daucus carota</i>)、菊蒿(<i>Tanacetum vulgare</i>)、蓍(<i>Achillea millefolium</i>)等	蜘蛛、草蛉、瓢虫、食蚜蝇、寄生蜂、灰喜鹊、红脚隼、戴胜、麻雀、黑卷尾等
	沟渠生境: 驴蹄草(<i>Caltha palustris</i>)、沟酸浆(<i>Erythranthe tenella</i>)、沼泽乳草(<i>Asclepias incarnata</i>)、三白草(<i>Saururus chinensis</i>)、梭鱼草(<i>Pontederia cordata</i>)、旋覆花(<i>Inula japonica</i>)、石龙芮(<i>Ranunculus sceleratus</i>)、蛇床(<i>Cnidium monnieri</i>)、地锦、苍耳、泥胡菜等	蜘蛛、草蛉、瓢虫、寄生蜂等

等常绿针叶植物是天敌很好的选择。此外,有些食源植物如菊科、禾本科、豆科分泌的花蜜和花粉,也是天敌节肢动物很好的替代食物。天敌保护型林地营建过程中可考虑增加林间天敌食源植物,如在林冠间隙、林缘空地栽植苜蓿(*Medicago sativa*)、白花泡桐(*Paulownia fortunei*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)等蜜源植物,在山坡上种植柿树(*Diospyros kaki*)、枣树(*Ziziphus jujuba*)等果源植物,在中下灌木层和草本层种植连翘(*Forsythia suspensa*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等灌丛,以及地锦(*Parthenocissus tricuspidata*)、苍耳(*Xanthium strumarium*)、一

年蓬(*Erigeron annuus*)、泥胡菜(*Hemisteptia lyrata*)等草本植物;并增加天敌食源植物的比例,保证灌木层盖度 $\geq 40\%$,草本层平均高度 ≥ 30 cm、盖度 $\geq 30\%$ ^[17],可以提高天敌的繁殖量和寄生率(表2)。

3.3 营建巢穴庇护空间

巢穴是天敌栖息、居住、繁衍不可或缺的基本空间。天敌一般选择层次丰富的植物材料作为筑巢工具和庇护空间,也可以在地面浅坑、地表枯枝落叶、树干裂缝中进行越冬,特别是聚集大量枯枝落叶的坑洼生境更加复杂^[95],如郁闭度为0.75~0.85的针阔叶林的枯枝落叶层平均厚度可达2.5~6.0 cm,是天敌节肢动物庇护的优良场所。部分在地面筑巢的

天敌,可以栖息于疏松的土壤空隙或石堆提供的孔穴空间;而栖息于土壤中的天敌,在0~5 cm的土层中分布数量最多,且大多数偏好潮湿、温度适中、腐殖质较厚且孔隙>500 μm(由作物根系和土壤动物形成)的土壤^[96]。

在天敌保护型林地营建中可以保存大树枝、树桩、枯木等木质物残体,以及保留林木凋落物,使其厚度达到1~2 cm,给天敌节肢动物提供隐蔽空间。同时可人为制造一些直径50~100 cm、深度30~60 cm的浅坑,或在土壤表面钻出10~12 cm的洞,提高土壤孔隙度,增加土壤纵向环境的异质性,能大大提高天敌节肢动物的生存空间,有利于土壤天敌节肢动物的繁衍^[97]。天敌鸟类的休憩行为主要发生在阔叶乔木树冠空间,针叶乔木也时常作为其隐蔽或休息的场所,而植物的枝条结构或者树洞是更加适合天敌鸟类筑巢的点位。因此,选用高大乔木林,并栽植复层灌木丛和草本地被将林下空间填满^[98-99],可以为天敌鸟类提供良好的隐蔽庇护空间。

3.4 增强景观格局异质性

对营造适宜的天敌栖息地、提升生物多样性而言,还要注重优化林地与其他生境的分布格局与空间结构,提升区域景观的组成异质性和结构异质性^[82,100]。生境组成和结构越丰富,适宜天敌生存的微环境越多,天敌密度越高。相应地,作物一害虫一天敌所形成的食物网就越复杂,群落结构越稳定。通过控制不同景观要素的数量和面积比例来调整空间组成结构,达到景观格局的最优配置,从而实现生物多样性的维持与提升^[101-102]。

3.4.1 景观基质多样

依据场地现状营建多样化的河流缓冲带、树篱、野花带、防护林带等一体化农林复合系统^[39,47,103-104],确保非作物生境占地约20%,以充分提升生物多样性和发挥生态系统服务功能。通过设计区域性农田多元化景观格局,形成“马赛克”镶嵌体景观^[105],促进天敌在作物生境和非作物生境内巡回扩散迁徙,使得天敌具有更多的替代生境选择,生存资源更加丰富。

3.4.2 生境斑块复杂

林地生境斑块的大小、形状和分布格局

会对食物网中害虫一天敌的群落结构产生影响。在一定范围内,多数物种会随着平均斑块面积和边界蔓延度的增加而增加,基于对不同天敌节肢动物的活动尺度研究总结,控制生境斑块直径在1~2 km最适宜天敌节肢动物生存^[106-107]。同时为了提高生境斑块的形状指数,可以参考Laurance等^[108]提出的计算方法: $SI=P/[2 \times (\pi \times A)^{0.5}]$ 。式中: P 代表生境斑块的周长; A 代表生境斑块的面积; SI 用来衡量生境斑块形状与正圆形之间的偏离程度,当 SI 的值越大,表明岛屿形状越复杂,离正圆形越远。同时可结合空间布局的视角将这些形状复杂、边界不规则的生境斑块组合嵌套^[109],延长边缘交错区,减少天敌迁徙阻力,增大天敌在不同生境间的交流界面和扩散程度。

3.4.3 连接廊道合理

通过研究天敌的动态分布和迁徙规律,找到天敌栖息的重要地段和关键点,分析各要素之间的景观连接度,可在林地与农田、河流或水塘等其他生境之间,建立一定数目、宽度、排列方式的生物廊道和脚踏石,并按照天敌移动路线进行空间分布,如农田与非农田之间的树篱、野花和野草带、沟渠等线性和交错带状结构以及树林斑块、坑塘、石堆和田间岛屿等点状结构。其中天敌节肢动物廊道宽度3~30 m^[104],有助于降低天敌节肢动物被捕食的风险和提高害虫一天敌间的相互作用关系;天敌鸟类飞行距离较远,廊道宽度30~400 m^[110],有助于为天敌鸟类提供适宜的停留空间。廊道植物应选用适应当地气候、花期错开、能够吸引和藏匿天敌的种类。同时也要考虑道路、村落等人居干扰因子对天敌生存和栖息的影响,有研究表明距离道路越远,天敌密度越高,因此廊道布局要尽量距离干扰因子50 m以上以减少其影响^[59]。

4 结论与展望

4.1 结论

在生态文明建设的新时代背景下,集成城市森林生物多样性提升关键技术已成为城市森林提质工作的重要内容。在此背景下,林地因物种组成多样、物质能量循环流动复杂、生态环境平衡稳定、具有丰富的空间结构

和功能组成等优点,能够吸引天敌栖息和发挥控害作用,在树种配置、群落结构和空间格局方面皆对于天敌具有重要的保护机制。

为了更好地发挥远郊平原林地对相邻农田的生态效益,本研究提出天敌保护型林地营建策略,在该类林地中,作物、害虫和天敌之间可形成定性食物网,更好地维持农林生态系统稳定,为建设鸟语花香的生态森林,培育自然优美的森林景观贡献力量。具体营建策略包括4个方向。1)营建异龄复层混交林。混交林以多年龄混交的针阔叶林为主,确保林地内乔-灌-草层次结构完整并定期进行人工抚育,改善林下光热环境,为不同天敌提供多种生态位和丰富的食物资源。2)提升食物源植物的比例。多种植菊科、禾本科、豆科和蔷薇科等植物,在作物播种前和收割后为天敌提供替代食物资源,发挥资源库作用。3)营建巢穴庇护空间。保存林间木质物残体和枯枝落叶,选用针叶及高大枝条的树木为天敌提供筑巢掩护。4)增强景观格局异质性。保留并构建河流缓冲带、树篱、野花带、防护林带等一体化农林复合系统,在景观尺度上营造高比例、强异质性的非作物生境,对其进行合理建设和布局以实现天敌多样性保护和害虫综合治理,提升区域控害服务水平以实现生态系统可持续发展。

4.2 展望

虽然大部分研究认为林地是适宜天敌栖息的场所,营建天敌保护型林地能够增强天敌的控害能力,有利于维持生态系统的平衡稳定,但也有研究认为,保护天敌多样性并不总能提高生物防治效果,因为天敌间存在集团内捕食或者生态位互补,这种相互竞争或协作的关系决定了最终的控害效果^[111-113]。同时,林地也存在招引农业害虫的可能。此外,林间凋落物虽然可以庇护天敌,但凋落物过多也会滋生病菌,影响林木和作物的健康生长。亦有少量研究表明,林地与农田中的天敌个体数和物种数不存在显著差异^[43,114],多样化的农林复合景观如何调节生物多样性还有待进一步研究。

随着农田生物控害管理向区域多元化生态调控体系格局发展,未来我们应以动态调节的眼光看待作物一害虫一天敌三者之间形

成的互作有机整体,明晰害虫-天敌食物网的结构、功能以及提升其稳定性和恢复力的调控机制,关注天敌迁徙的时空效应,以及更广泛的天敌种群栖息特征,包括捕食性、寄生性和微生物类天敌,并系统考虑害虫-天敌在地上和地下相互作用的生态过程,和如何抑制天敌的集团内捕食、竞争等非消耗效应和冗余功能等。这些科学问题都有待未来进一步研究,以期实现农林生态系统服务功能的发挥及多方生态利益的平衡。

参考文献 (References):

- [1] 张慧,林美卿.我国农业生态问题、原因及对策研究[J].山东农业大学学报(社会科学版),2019,21(2):86-90,107.
- [2] 刘丹,巩前文,杨文杰.改革开放40年来中国耕地保护政策演变及优化路径[J].中国农村经济,2018,408(12):39-53.
- [3] 刘云慧,王诗皓,陈宝雄,等.中国农业生物多样性保护主要政策、措施回顾及2020年后展望[J].生态与农村环境学报,2021,37(10):1225-1233.
- [4] 郑云开,尤民生.农业景观生物多样性与害虫生态控制[J].生态学报,2009,29(3):1508-1518.
- [5] ERISMAN J W, VAN EEKEREN N, DE WIT J, et al. Agriculture and Biodiversity: A Better Balance Benefits Both[J]. *AIMS Agriculture and Food*, 2016, 1(2): 157-174.
- [6] SUTTER L, ALBRECHT M. Synergistic Interactions of Ecosystem Services: Florivorous Pest Control Boosts Crop Yield Increase Through Insect Pollination[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, 283(1824): 1-8.
- [7] 王润,丁彦彦,卢训令,等.黄河中下游农业景观异质性对传粉昆虫多样性的多尺度效应:以巩义市为例[J].应用生态学报,2016,27(7):2145-2153.
- [8] 尤民生.论我国昆虫多样性的保护与利用[J].生物多样性,1997,5(2):56-62.
- [9] HARRIS J M. *World Agriculture and the Environment*[M]. New York: Garland Publishing, Inc., 1990: 227.
- [10] 欧阳芳,赵紫华,戈峰.昆虫的生态服务功能[J].应用昆虫学报,2013,50(2):305-310.
- [11] 戈峰,欧阳芳,赵紫华.基于服务功能的昆虫生态调控理论[J].应用昆虫学报,2014,51(3):597-605.
- [12] 党英侨,王小艺,杨忠岐,等.中国林业害虫生物防治研究进展[J/OL].中国森林病虫,2022:1-8[2022-04-12].
https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SLBC20220317000.
- [13] HOFFMANN H, PETER F, HERRMANN J D, et al. Benefits of Wildflower Areas as Overwintering Habitats for Ground-Dwelling Arthropods Depend on Landscape Structural Complexity[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 314: 107421.
- [14] 边振兴,龚玲春,果晓玉,等.农业景观组成对玉米螟天敌数量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(1):30-41.
- [15] 张鑫,王艳辉,刘云慧,等.害虫生物防治的景观调节途径:原理与方法[J].生态与农村环境学报,2015,31(5):617-624.
- [16] GURR G M, WRATTEN S D, LANDIS D A, et al. Habitat Management to Suppress Pest Populations: Progress and Prospects[J]. *Annual Review of Entomology*, 2017: 91-109.
- [17] 北京市园林绿化局(首都绿化委员会办公室).北京市人民政府关于印发《北京市新一轮百万亩造林绿化行动计划》的通知[EB/OL].(2018-04-02)[2022-04-18].http://ylhj.beijing.gov.cn/zwgk/zdgc/201911/t20191122_728930.shtml.
- [18] 北京市园林绿化局(首都绿化委员会办公室).北京森林城市发展规划(2018—2035年)[EB/OL].(2020-01-23)[2022-05-19].http://ylhj.beijing.gov.cn/zwgk/ghxx/gh/202004/t20200423_1881046.shtml.
- [19] 党英侨,王小艺.农林害虫天敌昆虫的捕食、拟寄生和寄生现象[J].生物学教学,2021,46(11):7-10.
- [20] 穆尼.加拿大下弗雷泽河盆地鸟类栖息地使用情况研究:对于城市规划和生态保护的意义[J].风景园林,2011,18(5):143-155.
- [21] 姜英生,孙玉诚,陈法军,等.华北地区不同农田景观格局下天敌昆虫和鸟类对玉米蚜的控制作用[J].中国生物防治学报,2021,37(5):863-869.
- [22] 刘冬,沈渭寿,朱四喜,等.中国农林业害虫分布特征及其影响因素[J].生态学杂志,2014,33(12):3322-3331.
- [23] 苏仕卫,韩喜福,方向前,等.桦甸市大豆田主要害虫发生规律及防治技术[J].现代农业科技,2018(9):152-154.
- [24] 李永波.大豆田节肢动物的群落特征[J].现代化农业,2017(6):6-7.
- [25] 史春玲.水稻病虫害绿色防控技术应用研究[J].新农业,2020(12):40-41.
- [26] 袁堂玉,矫岩林,赵健,等.浅谈花生主要虫害防治方法[J].安徽农业通报(上半月刊),2011,17(11):144-145.
- [27] 张崇.小麦常见虫害类型及防治措施[J].河北农业,2018(11):27-28.
- [28] 张译月,王妮妮,邹华东.浅谈玉米病虫害的类型及防治[J].新农业,2022(2):15-16.
- [29] 刘芝若.基于天敌昆虫栖息地营建的农林复合型生态景观规划设计:以北京市顺义区西小营农林地块为例[D].北京:北京林业大学,2021.
- [30] 郎江丽.天敌昆虫在林木害虫防治中的应用分析[J].山西林业,2019(5):46-47.
- [31] VANDERMEER J, PERFECTO I, SCHELLHORN N. Propagating Sinks, Ephemeral Sources and Percolating Mosaics: Conservation in Landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(4): 509-518.
- [32] WANG M N, AXMACHER J C, YU Z R, et al. Perennial Crops can Complement Semi-Natural Habitats in Enhancing Ground Beetle (Coleoptera: Carabidae) Diversity in Agricultural Landscapes[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107701.
- [33] 种海南.农田景观格局对稻田越冬蜘蛛和步甲的影响[D].南昌:江西农业大学,2021.
- [34] 张旭珠,韩印,宇振荣,等.半自然农田边界与相邻农田步甲和蜘蛛的时空分布[J].应用生态学报,2017,28(6):1879-1888.
- [35] 江宏燕,陈世春,刘翔,等.林下茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构研究[J].中国农学通报,2020,36(22):111-115.
- [36] 赵爽,宋博,丁圣彦,等.黄河下游农业景观中景观结构和生境特征对林表生蜘蛛多样性的影响[J].生态学报,2017,37(6):1816-1825.
- [37] WOLTZ J M, ISAACS R, LANDIS D A. Landscape Structure and Habitat Management Differentially Influence Insect Natural Enemies in an Agricultural Landscape[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 152: 40-49.
- [38] 阿尔孜姑丽·肉孜,丁新华,吐尔逊·阿合买提,等.新疆北部地区农林复合生境瓢虫群落多样性及其季节动态分析[J].中国生物防治学报,2021,37(4):679-691.
- [39] 杨钊,闫国增,周在豹,等.农林复合环境林带对瓢虫种群分布的影响规律[J].江西农业,2019(16):114-120.
- [40] 王鼎慧.论农林益鸟的种类以及保护措施[J].黑龙江科技信息,2011(9):218.
- [41] 江婷,付道猛,张万娜,等.农田景观格局对害虫天敌生态控害功能的调控作用[J].应用生态学报,2019,30(7):2511-2520.
- [42] GAIGHER R, PRYKE J S, SAMWAYS M J. Old Fields Increase Habitat Heterogeneity for Arthropod Natural Enemies in an Agricultural Mosaic[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 230: 242-250.
- [43] HAWRO V, CERYNGIER P, TSCHARNTKE T, et al. Landscape Complexity is not a Major Trigger of Species Richness and Food Web Structure of European Cereal Aphid Parasitoids[J]. *BioControl*, 2015, 60(4): 451-461.
- [44] THOMPSON I, MACKAY B, MCNULTY S G, et al. Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change: A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems[J]. *Convention on Biological Diversity Technical Series*, 2009, 43: 1-67.
- [45] HENDERSON L E, BRODERS H G. Movements and Resource Selection of the Northern Long-Eared Myotis (*Myotis septentrionalis*) in a Forest-Agriculture Landscape[J]. *Journal of Mammalogy*, 2008, 89(4): 952-963.
- [46] 汤西子.“农业—自然公园”规划[D].重庆:重庆大学,2018.
- [47] 武晶,刘志民.生境破碎化对生物多样性的影响研究综述[J].生态学杂志,2014,33(7):1946-1952.
- [48] 刘威尔,张鑫,张娟,等.农田缓冲带规划建设与天敌保护效果研究[J].中国生态农业学报,2017,25(2):172-179.
- [49] GIBBONS P, LINDENMAYER D B, FISCHER J, et al. The Future of Scattered Trees in Agricultural Landscapes[J]. *Conservation Biology*, 2008, 22(5): 1039-1319.
- [50] KNAPP M, ŘEŽÁČ M. Even the Smallest Non-Crop Habitat Islands Could be Beneficial: Distribution of Carabid Beetles and Spiders in Agricultural Landscape[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123052.
- [51] 刘云慧,宇振荣,罗明.国土整治生态修复中的农业景观生物多样性保护策略[J].地学前缘,2021,28(4):48-54.
- [52] 赵爽,宋博,侯笑云,等.河南省巩义市不同类型林地内中型土壤动物群落组成及多样性[J].生态与农村环境学报,2015,31(5):704-710.
- [53] NORMANN C, TSCHARNTKE T, SCHERBER C. Interacting Effects of Forest Stratum, Edge and Tree Diversity on Beetles[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 361: 421-431.
- [54] 刘兴平,刘向辉,王国红,等.多样化松林中昆虫群落多样性特征[J].生态学报,2005(11):184-190.
- [55] 黄越.北京城市绿地鸟类生境规划与营造方法研究[D].北京:清华大学,2015.
- [56] 汪佳涵,杨雨荷,赵扬,等.香根草在水稻田绿色防控上的应用[J].新农村,2020(4):21-22.
- [57] 边振兴,杨祎博,果晓玉,等.农田防护林对田间地节肢动物分布的影响:以昌图县为例[J].中国生态农业

学报(中英文), 2020, 28(12): 1835-1846.

[58] 周雯, 陈拓舟, 饶显龙, 等. 基于引鸟和护鸟的城市绿地植物景观营造[J]. 中国城市林业, 2018, 16(1): 25-29.

[59] 李凯. 农林复合生态系统林带对捕食性节肢动物种群动态的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

[60] 肖放. 巫巫山森林生态系统健康评价及指示昆虫的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.

[61] ZHENG G, LI S Q, YANG X D. Spider Diversity in Canopies of Xishuangbanna Rainforest (China) Indicates an Alarming Juggernaut Effect of Rubber Plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2015, 338: 200-207.

[62] 陈婉, 袁思佳, 刘威, 等. 江苏阜宁农田鸟类群落谱系和功能多样性[J/OL]. 生态学杂志, 2022: 1-21[2022-04-07]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=STXZ20220318004.

[63] SCHÜTZ C, SCHULZE C H. Functional Diversity of Urban Bird Communities: Effects of Landscape Composition, Green Space Area and Vegetation Cover[J]. Ecology and Evolution, 2015, 5(22): 5230-5239.

[64] 卢训令, 刘俊玲, 丁圣彦. 农业景观异质性与生物多样性与生态系统服务的影响研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4602-4614.

[65] CORMONT A, SIEPEL H, CLEMENT J, et al. Landscape Complexity and Farmland Biodiversity: Evaluating the CAP Target on Natural Elements[J]. Journal for Nature Conservation, 2016, 30: 19-26.

[66] 赵爽, 宋博, 侯笑云, 等. 黄河下游农业景观中不同生境类型地表节肢动物优势类群[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4398-4407.

[67] MESTRE L, SCHIRMEL J, HETZ J, et al. Both Woody and Herbaceous Semi-Natural Habitats are Essential for Spider Overwintering in European Farmland[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 267: 141-146.

[68] 刘雨芳, 阳菲, 谢美琦, 等. 湘中丘陵区自然景观异质性与稻田捕食性天敌保护及生态控害效能的相关性[J]. 植物保护学报, 2021, 48(4): 862-871.

[69] RAND T A, TYLIANAKIS J M, TSCHARNTKE T. Spillover Edge Effects: The Dispersal of Agriculturally Subsidized Insect Natural Enemies into Adjacent Natural Habitats[J]. Ecology Letters, 2006, 9(5): 603-614.

[70] RUSCH A, CHAPLIN-KRAMER R, GARDINER M M, et al. Agricultural Landscape Simplification Reduces Natural Pest Control: A Quantitative Synthesis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 221: 198-204.

[71] 龚玲春. 下辽河平原典型县域农田景观组成对玉米螟天敌数量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.

[72] 边振兴, 李晓璐, 于淼. 东北平原典型玉米种植区农业景观植物多样性研究: 以昌图县为例[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 480-492.

[73] TSCHARNTKE T, STEFFAN-DEWENTER I, KRUESS A, et al. Contribution of Small Habitat Fragments to Conservation of Insect Communities of Grassland-Cropland Landscapes[J]. Ecological Application, 2002, 12(2): 354-363.

[74] FAHRIG L, BAUDRY J, BROTONS L, et al. Functional Landscape Heterogeneity and Animal Biodiversity in Agricultural Landscapes[J]. Ecology Letters, 2011, 14(2): 101-112.

[75] 杨龙, 徐磊, 刘冰, 等. 农田景观格局对华北地区麦田早期瓢虫种群发生的影响[J]. 应用昆虫学报, 2016, 53(3): 612-620.

[76] LABRIE G, CODERRE D, LUCAS É. Overwintering Strategy of Multicolored Asian Lady Beetle (Coleoptera:

Coccinellidae): Cold-Free Space as a Factor of Invasive Success[J]. Annals of the Entomological Society of America, 2008, 101(5): 860-866.

[77] 刘文惠. 不同农田斑块结构下农田界面捕食性天敌边际效应及其对苜蓿刈割的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.

[78] TSCHARNTKE T, BOMMARCO R, CLOUGH Y, et al. Conservation Biological Control and Enemy Diversity on a Landscape Scale[J]. Biological Control, 2007, 43(3): 294-309.

[79] TSCHARNTKE T, BRANDL R. Plant-Insect Interactions in Fragmented Landscapes[J]. Annual Reviews in Entomology, 2004, 49(1): 405-430.

[80] 尤士骏, 张杰, 李金玉, 等. 利用生物多样性控制作物害虫的理论与实践[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(6): 1125-1147.

[81] 边振兴, 杨玉静, 果晓玉, 等. 农业景观异质性地表节肢动物多样性影响的最优尺度分析[J]. 生态学杂志, 2022, 41(3): 512-519.

[82] 宋博, 丁圣彦, 赵爽, 等. 农业景观异质性与生物多样性及其生态系统服务的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 443-450.

[83] 张庆费, 许源. 城市森林生物多样性保育途径探讨[J]. 中国城市林业, 2016, 14(3): 1-5.

[84] 龚岚. 北京城区典型城市森林结构特点分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.

[85] 刘帅. 天然次生林林分结构分析及多目标智能优化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.

[86] 杨麟, 裴鸿菲, 武静. 武汉东湖绿心鸟类栖息地保护与生态修复策略[J]. 中国园林, 2021, 37(6): 93-98.

[87] 王润. 黄河中下游农业景观异质性与传粉昆虫多样性的多尺度效应[D]. 郑州: 河南大学, 2017.

[88] 范仲玖, 王登亚. 农田林网和林带肋地原因及防治对策[J]. 农技服务, 2008(3): 86-86.

[89] LI N, WANG Z, LI X H, et al. Bird Functional Traits Affect Seed Dispersal Patterns of China's Endangered Trees Across Different Disturbed Habitats[J]. Avian Research, 2018, 9(1): 1-6.

[90] 陆彩虹, 鲁长虎. 南京中山植物园鸟类对香樟果实(种子)的取食[J]. 动物学杂志, 2019, 54(6): 784-792.

[91] 何海燕, 王楠, 董路. 北京城市鸟类对食源植物利用规律[J]. 动物学杂志, 2021, 56(4): 491-499.

[92] LI N, BAI B, LI X H, et al. Dispersal of Remnant Endangered Trees in a Fragmented and Disturbed Forest by Frugivorous Birds[J]. Journal of Plant Research, 2017, 130(4): 669-676.

[93] 王美娜, 卢训令, 崔洋, 等. 不同人为干扰下林地类型对传粉昆虫的影响: 以河南省巩义市为例[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 464-474.

[94] 吴学峰. 昆虫野花带设计与应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

[95] 陈曦, 张旭珠, 金池, 等. 太行山区不同农业景观生境的蜘蛛群落结构特征及其影响因子[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1488-1498.

[96] 耿玉清. 北京八达岭地区森林土壤理化特征与健康指数的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.

[97] 袁嘉, 杜春兰. 城市植物景观与关键种的协同共生设计框架: 以野花草甸与传粉昆虫为例[J]. 风景园林, 2020, 27(4): 50-55.

[98] PENNINGTON D N, BLAIR R B. Habitat Selection of Breeding Riparian Birds in an Urban Environment: Untangling the Relative Importance of Biophysical Elements and Spatial Scale[J]. Diversity and Distributions, 2011, 17(3): 506-518.

[99] MÜLLER N, KAMADA M. URBIO: An Introduction to the

International Network in Urban Biodiversity and Design[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2011, 7(1): 1-8.

[100] 孙玉芳, 李想, 张宏斌, 等. 农业景观生物多样性功能和保护对策[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 993-1001.

[101] 范敏, 彭羽, 王庆慧, 等. 景观格局与植物多样性的关系及其空间尺度效应: 以浑善达克沙地为例[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2450-2461.

[102] 冯舒, 汤茜, 卢训令, 等. 农业景观中非农业景观要素结构特征对植物多样性的影响: 以封丘县为例[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1549-1560.

[103] TSCHUMI M, ALBRECHT M, BÄRTSCHI C, et al. Perennial, Species-Rich Wildflower Strips Enhance Pest Control and Crop Yield[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 220: 97-103.

[104] 戴漂漂, 张旭珠, 肖晨子, 等. 农业景观害虫控制生境管理及植物配置方法[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 9-19.

[105] ZHAO Z H, REDDY G V P, HUI C, et al. Approaches and Mechanisms for Ecologically Based Pest Management Across Multiple Scales[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 230: 199-209.

[106] HOU X Y, DING S Y, ZHAO S, et al. The Response of Spiders to Less-Focused Non-Crop Habitats in the Agricultural Landscape Along the Lower Reach of the Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(7): 1113-1126.

[107] THIES C, STEFFAN-DEWENTER I, TSCHARNTKE T. Effects of Landscape Context on Herbivory and Parasitism at Different Spatial Scales[J]. Oikos, 2003, 101(1): 18-25.

[108] LAURANCE W F, YENSEN E. Predicting the Impacts of Edge Effects in Fragmented Habitats[J]. Biological Conservation, 1991, 55(1): 77-92.

[109] 彭羽, 范敏, 卿凤婷, 等. 景观格局对植物多样性影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1061-1068.

[110] 宇振荣, 郑渝, 张晓彤. 乡村生态景观建设: 理论和方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.

[111] MENALLED F D, COSTAMAGNA A C, MARINO P C, et al. Temporal Variation in the Response of Parasitoids to Agricultural Landscape Structure[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 96(1-3): 29-35.

[112] MAAS B, KARP D S, BUMRINGSRI S. Bird and Bat Predation Services in Tropical Forests and Agroforestry Landscapes[J]. Biological Reviews, 2016, 91(4): 1081-1101.

[113] LETOURNEAU D K, JEDLICKA J A, BOTHWELL S G, et al. Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40(1): 573-592.

[114] HAWRO V, CERYNGIER P, KOWALSKA A, et al. Landscape Structure and Agricultural Intensification are Weak Predictors of Host Range and Parasitism Rate of Cereal Aphids[J]. Ecological Research, 2017, 32(2): 109-115.

表格来源 (Sources of Tables):

表1由作者根据参考文献[22]~[29]整理绘制; 表2由作者根据参考文献[91][93][94]整理绘制。

(编辑 / 邓泽宜)