

DOI: 10.5846/stxb202205131348

周阳, 权子豪, 段曼微, 严飞, 李香, 胡阳, 张东, 李凯. 基于林分昆虫多样性调查的传统灯诱法改进效果分析. 生态学报, 2023, 43(16): 6851-6861.

Zhou Y, Quan Z H, Duan M W, Yan F, Li X, Hu Y, Zhang D, Li K. Effect of the improvement of traditional light trapping method based on the investigation of insect diversity in different forest stands. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6851-6861.

基于林分昆虫多样性调查的传统灯诱法改进效果分析

周 阳¹, 权子豪¹, 段曼微¹, 严 飞², 李 香³, 胡 阳⁴, 张 东¹, 李 凯^{1,*}

1 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

2 福州海关技术中心, 宁德 352100

3 北京市绿地养护管理事务中心, 北京 102200

4 北京市通州区林业保护站, 北京 101100

摘要: 昆虫在生物多样性调查中具有不可替代的地位, 灯诱法是效率最高的昆虫采集方法之一, 然而传统的灯诱方法存在诱集范围无法界定、采样流程标准性不足等问题。为此, 使用自制的聚光灯诱箱 (Spotlight Box Trap, SBT) 作为改进灯诱方法, 并使用灯诱帐 (Moth Collecting Tent, MCT) 作为传统灯诱法进行对照; 以北京杨 (*Populus×beijingensis*) 与油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林为样地, 对两种灯诱装置采集的蛾类数量及物种组成、物种多样性指数与形态参数等多个指标进行评价。共采集蛾类 24 科 164 种 6728 号, 其中北京杨林分 SBT 采集 19 科 93 种 1164 号, MCT 采集 22 科 125 种 2573 号; 油松林分 SBT 采集 21 科 87 种 1044 号, MCT 采集 22 科 117 种 1947 号。分析显示: (1) MCT 采集的个体数量与物种数量均高于 SBT, 总体上 SBT 在不同样地间的数据误差水平更低。(2) 两种灯诱装置采集的蛾类优势种组成显著不同 ($P < 0.05$); SBT 共有种的数量比例始终高于 MCT, 即后者的特有种占比比例更高。(3) 总体上 SBT 物种多样性指数的数据误差水平更低。(4) MCT 采集的蛾类物种体型更大 (体长约为 SBT 的 1.20 倍)、飞行能力更强 (相关参数约为 SBT 的 1.20 倍至 1.36 倍)。结果表明, 在林分昆虫多样性的调查中, 传统灯诱法的数据稳定性较差, 对林分的代表性不足。聚光灯诱箱因其对光域的可控性和采集昆虫的规范性, 具备更高的稳定性, 在森林昆虫多样性调查与监测中具有更好的适用性与应用前景。

关键词: 林分; 昆虫多样性; 灯诱法; 聚光灯诱箱; 蛾类; 采集效果

Effect of the improvement of traditional light trapping method based on the investigation of insect diversity in different forest stands

ZHOU Yang¹, QUAN Zihao¹, DUAN Manwei¹, YAN Fei², LI Xiang³, HU Yang⁴, ZHANG Dong¹, LI Kai^{1,*}

1 College of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Technology Center of Fuzhou Customs District Ningde, Ningde 352100, China

3 Beijing Greenland Maintenance and Management Affairs Center, Beijing 102200, China

4 Forestry Protection Station of Tongzhou District, Beijing 101100, China

Abstract: Insects play an irreplaceable role in biodiversity survey, while light trapping is one of the most efficient methods in the insect collection and it is widely used for investigation of nocturnal insect communities. The traditional light trapping method, however, has the problem that affects the reliability of the survey results. Firstly, its lighting range is not controlled, which the trapping area cannot be defined. Secondly, while the standardization and stability of data acquisition is essential in insect ecology researches, the manual collection is not as standard as automatic methods. Therefore, we devised an improved device called “spotlight box trap” (SBT), and used the moth collecting tent (MCT) as the traditional

基金项目: 北京林业大学大学生创新创业训练项目 (X202110022213)

收稿日期: 2022-05-13; **网络出版日期:** 2023-06-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiujiu@bjfu.edu.cn

method. The insect collection comparison study of the two light trapping devices was carried out in the sample plots and involved two forest stands (the pure plantation of *Populus×beijingensis* and *Pinus tabulaeformis*), with moths (night active Lepidoptera) as the representative insect groups. The two light trapping methods were evaluated by comparing the differences and error levels of the number of individuals and species, species composition and dominance, species diversity index and morphological parameters of collected moths. A total of 6728 moths' specimens of 24 families, 164 species were collected; 1164 of 19 families, 93 species by SBT and 2573 of 22 families, 125 species were collected by MCT in *Populus×beijingensis* forest; 1044 of 21 families, 87 species by SBT and 1947 of 22 families, 117 species were collected by MCT in *Pinus tabulaeformis* forest. The results showed that: (1) the number of individuals and species in MCT was higher than that in SBT, and overall SBT had lower level of data error across sites. (2) Within the same month, the dominant moth community structure collected by the two devices was significantly different ($P<0.05$), and the proportion of shared species was lower in MCT than that in SBT, that is, the former device collected more endemic species. (3) In different plots, the data error levels of richness, diversity and evenness index of SBT were higher than those of MCT. (4) The moth species collected by MCT had overall larger body size (1.20 times that of SBT) and stronger flight ability (the relevant parameters are about 1.20 to 1.36 times than those of SBT). In conclusion, we consider that in the investigation of forest insect diversity, although the traditional light trap is commonly used, the data stability of the method is not reliable, and its representation of the forest is insufficient. This makes it difficult to conduct insect communities based on forest stands. The improved device, "spotlight box trap", is more stable due to its controllability of light domain and standardization of collection process, and has better applicability and application prospects in forest insect diversity investigation and monitoring.

Key Words: forest stand; insect biodiversity; light trapping; spotlight box trap; moths; collection effectiveness

昆虫是生态系统中物质和能量循环过程不可缺少的环节^[1-2]; 相较兽类和鸟类, 昆虫对环境因素的变化更加敏感^[3], 适于反映较小尺度生境中的细微变化^[4-5], 在生物多样性调查中占有不可替代的地位^[6-7]。在森林生态系统中, 林分(如树种组成、林龄、林型以及林下植被组成等)是影响昆虫多样性的重要因素^[8-10], 也是设置采集样地的重要依据。

在生物多样性调查中, 样本采集是重要的调查基础^[11]。灯诱法是效率最高的昆虫采集方法之一^[12-13], 传统的灯诱法为: 将幕布挂在诱虫灯后方, 使用毒瓶对幕布上的昆虫进行人工采集, 该方法在自然森林的昆虫多样性调查中已相当普及^[14-15]。然而, 由于缺乏通用的灯诱法标准, 灯诱装置的结构特征与布设位点等方面所存在的差异, 将导致获得的数据之间并不具备完全的可比较性^[16-19]。在传统灯诱法中, 诱集光域的不可控意味着难以界定采集范围; 此外, 依赖人工采集的收集方式也降低了采样流程的标准性。

蛾类是灯诱法采集的主要昆虫类群, 在食性与栖息地等习性方面与植被类型密切相关, 被认为是反映森林斑块微生境变化的合适调查对象与生物指标^[20-21]。本研究基于传统灯诱法的潜在不足, 自制了诱集光域可控的、自动采集的灯诱装置作为改进方法, 并使用传统灯诱法及装置作为对照。使用两种灯诱装置在不同林分类型的样地中采集蛾类, 通过对比二者采样结果, 分析各自特点, 为森林生态系统中基于林分类型的昆虫多样性调查、监测与评价工作提供科学依据与优选方案。

1 研究区概况

本研究在北京市通州区进行, 通州区是北京市“平原百万亩造林工程”中的重点区域之一^[22], 该地区的城市人工林具有集中连片的特点, 栽植方式以块状混交与带状混交为主。试验地点位于通州区马驹桥镇平原造林小班(39°46'6"—39°45'51" N, 116°38'18"—116°38'52" E)与东郊森林公园华北树木园(39°59'8"—39°58'42" N, 116°39'38"—116°40'24" E), 均属于 2012 年第一轮百万亩造林地块。主要造林树种为油松

(*Pinus tabulaeformis*)、垂柳(*Salix babylonica*)、北京杨(*Populus×beijingensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和国槐(*Sophora japonica*)等,平均郁闭度为 0.75;林下植被主要有藜(*Chenopodium album*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、苋(*Amaranthus tricolor*)和蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)等,平均盖度为 0.40,整体较为稀疏。

2 材料与方法

2.1 实验装置

聚光灯诱箱(Spotlight Box Trap,简称 SBT,图 1)是本研究自制的灯诱装置:高度约为 0.7 m,主体为遮光灯罩和前开式收集箱,通过将遮光灯罩倒置,在林地中形成垂直向上的倒圆锥形光路;收集箱中盛有熏蒸杀虫剂,落入到装置中的昆虫,被毒杀后将落在收集箱底部,每间隔 60 min 将采集的昆虫取出保存;该装置使用乙酸乙酯^[23]作为杀虫剂,光源为 250 W 的自镇流汞灯与户外移动电源(南阳市多助科技有限公司,D102 型)。

对照灯诱装置为灯诱帐(Moth Collecting Tent,简称 MCT,图 2),是传统灯诱法的代表装置:高度约为 1.8 m,主体为三分型白色帐布、三角地布和折叠帐杆;使用装有杀虫剂的广口瓶和离心管对降落在帐布上的蛾类进行人工采集,每间隔 60 min 进行一次;该装置使用的杀虫剂类型、灯泡与电源规格与聚光灯诱箱一致。



图 1 聚光灯诱箱(a)及其相关结构(b、c)与光路效果(d)

Fig.1 Spotlight box trap (a) and its related structures (b, c) and optical path effect (d)

2.2 样地设置

根据造林树种的常见性与代表性,本研究选取为北京杨林与油松林(长、宽大于 80 m)为对象,分别选择 3 块立地条件相似的独立林班作为本研究的重复样地,不同林班的间隔至少 80 m。样地造林树种胸径、树高和郁闭度等信息见表 1。

2.3 调查方法

本研究的调查时间为 2021 年 6 月至 8 月,该时间段为大多数蛾类物种活跃期^[24]。灯诱装置对比实验每



图 2 灯诱帐与光路效果

Fig.2 Moth collecting tent and its optical path effect

30 d 进行一次,确保不重复抽样间互不影响;为保证物候的一致性将每次调查时间控制在一周以内,遇雨天顺延。在每块样地中分别布设 1 个 SBT 和 1 个 MCT,位点与林班边缘相距至少 20 m,两种装置间相距至少 40 m;在每块样地中进行 1 晚的对比实验,灯诱时间均设定为 19:30—22:30,次日将采集的蛾类制成针插标本保存,再转入下一块样地;本研究共计在 2 种林分内分别完成 9 组对比实验。在实验室中对采集的蛾类物种进行鉴定,并根据采集时间、样地位置以及使用的灯诱装置完成汇总。

表 1 研究样地基本概况

Table 1 Basic characteristics of the sampling plots

样地概况 Plot surveys	北京杨林 <i>Populus×beijingensis</i> forest			油松林 <i>Pinus tabuliformis</i> forest		
	1	2	3	1	2	3
样地面积 Areas of plots/hm ²	1.51	1.64	1.26	1.04	0.85	0.72
株行距 Distance between trees/m		4.50±0.50			3.50±0.50	
平均胸径 Mean DBH/cm		19.33±1.52			7.64±0.81	
平均树高 Mean tree height/m		14.05±1.98			3.50±0.41	
平均枝下高 Mean underbranch height/m		3.50±0.45			1.23±0.22	
郁闭度 Canopy density		0.78±0.03			0.91±0.03	
林下植被盖度 Understory vegetation coverage		0.35±0.05			0.60±0.05	
林下植被组成 Understory vegetation composition	藜 <i>Chenopodium album</i>			藜 <i>Chenopodium album</i>		
	苋 <i>Cynanchum rostellatum</i>			蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>		
	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>			黄鹌菜 <i>Youngia japonica</i>		
	苋 <i>Amaranthus tricolor</i>			铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>		
	龙葵 <i>Solanum nigrum</i>			拉拉藤 <i>Galium spurium</i>		
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>			藜麦 <i>Chenopodium quinoa</i>		
相邻树种 Adjacent tree species	油松 <i>Pinus tabuliformis</i>			白蜡 <i>Fraxinus chinensis</i>		
	垂柳 <i>Salix babylonica</i>			青杨 <i>Populus cathayana</i>		
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>			国槐 <i>Sophora japonica</i>		

DBH:diameter at breast height

2.4 数据处理与分析方法

(1) 采集数量:统计采集蛾类的个体数量 N 与物种数量 S ,计算变异系数(CV)比较采集数量的离散程度。
(2) 物种组成:本研究将相对多度排序前 10 位的物种作为优势种进行分析^[24]。同时统计两种灯诱装置中的共有物种数量比例,基于相同的立地条件,对两种灯诱装置中共有的蛾类物种数量占各自采集物种数量的比例进行量化。
(3) 物种多样性:丰富度使用 Margalef 指数 $R = (S - 1)/\ln N$,多样性使用 Shannon-Wiener 指数

$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$, 均匀度使用 Pielou 指数 $J = H' / \ln S$, 式中 $P_i = n_i / N$ 为第 i 个物种个体占总采集个体数量 N 的比例, 计算变异系数 (CV) 比较以上三项物种多样性指数的离散程度。(4) 形态参数: 测量不同蛾类物种标本的体长 (Body length)、胸宽 (Thorax width)、前翅长 (Forewing length) 和翅负载 (Wing load) 作为蛾类的形态参数^[25], 其中翅负载 = 胸宽/前翅长度^[26], 基于不同物种的个体数量, 计算采集蛾类的形态参数的加权平均值。

本研究使用成对 t 检验比较采集数量、物种多样性指数与形态参数的差异, 使用卡方检验比较物种组成差异, 显著度设定 $P < 0.05$, 数据分析与作图在 Excel 2019 和 GraphPad Prism 8.0.2 中进行。

3 结果与分析

3.1 两种灯诱装置的蛾类采集数量比较

本研究共采集蛾类 24 科 164 种 6728 号, 在北京杨林中 SBT 采集到 19 科 93 种 1164 号, MCT 采集到 22 科 125 种 2573 号; 在油松林中 SBT 采集到 21 科 87 种 1044 号, MCT 采集到 22 科 117 种 1947 号。

采集数量的比较结果表明: 6 月至 8 月, MCT 中的个体数量与物种数量均高于 SBT。计算变异系数可知, 除 7 月油松林的个体数量外, MCT 中的变异系数均更大: 个体数量上, 在北京杨林中, MCT 的变异系数高出 SBT 10.88% 至 21.04%; 在油松中高出 4.46% 至 4.65%。物种数量上, 在北京杨林中, MCT 的变异系数高出 SBT 3.21% 至 12.66%, 在油松林中高出 0.04% 至 15.56% (表 2)。

在不同林分中, 两种灯诱装置采集数量差异的显著性呈现不同的规律: 在北京杨林中, 除 6 月与 7 月的个体数量外, 两种灯诱装置的差异均达到显著水平 ($P < 0.05$); 在油松林中, 除 7 月的个体数量与 8 月的物种数量外, 其余差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表 2 不同林分中两种灯诱装置的蛾类采集数量比较

Table 2 Comparison of moth collection quantity of two light traps in different forest stands

林分类型 Forest stand	月份 Month	灯诱装置 Light trap	个体数量 Individual number (N)		物种数量 Species number (S)	
			均值±标准误 Mean±SE	CV/%	均值±标准误 Mean±SE	CV/%
北京杨林 <i>Populus×beijingensis</i> forest	6 ^b	SBT	132.0±14.0	31.86	15.7±0.9	16.75
		MCT	281.0±40.0	42.74	19.3±1.3	19.96
	7 ^b	SBT	54.0±2.4	13.61	18.0±0.5	9.07
		MCT	147.0±16.9	34.65	37.0±2.7	21.73
	8 ^{ab}	SBT	202.0±6.6	9.81	41.7±1.0	6.88
		MCT	429.7±36.9	25.79	64.7±2.9	13.26
油松林 <i>Pinus tabuliformis</i> forest	6 ^{ab}	SBT	122.0±5.4	13.17	27.3±0.4	4.56
		MCT	281.0±16.5	17.62	34.3±0.6	5.49
	7 ^b	SBT	69.0±6.1	26.64	20.0±1.2	18.71
		MCT	98.7±7.0	21.30	28.3±1.8	18.75
	8 ^a	SBT	157.0±18.2	34.79	30.7±1.6	16.05
		MCT	269.3±35.4	39.45	41.0±4.3	31.61

ab 表示蛾类采集数量差异是否显著, a 表示个体数量 (N), b 表示物种数量 (S), 显著度设定 $P < 0.05$; SBT: 聚光灯诱箱 Spotlight Box Trap; MCT: 灯诱帐 Moth Collecting Tent; CV: 变异系数 Coefficient of Variation

3.2 两种灯诱装置的蛾类物种组成比较

3.2.1 优势种比较分析

在北京杨林中: 黑白尖蛾 (6 至 8 月)、杨银叶潜蛾 (6 月)、圆斑栉角斑螟 (7 月) 和槐叶柄卷蛾 (8 月) 是 SBT 中特有的优势种, 二点委夜蛾与玉米螟 (6 月)、巴塘暗野螟、白钩小卷蛾、八字地老虎与杨小舟蛾 (7 月)、甘蓝夜蛾与褐萍水螟 (8 月) 和细条纹野螟 (6 月、8 月) 是 MCT 中特有的优势种。另外, 双线织蛾 (6 月)、杨柳

小卷蛾(7月)、列蛾(7至8月)、桃展足蛾(6至7月)和藜茎鞘蛾(6至8月)在 SBT 中的优势度更高;旋幽夜蛾(6月)、白点暗野螟(7月)、二点织螟(6至8月)和槐尺蛾(6至7月)在 MCT 中的优势度更高。不同月份中,两种灯诱装置的优势种组成差异均显著($P<0.05$)。

在油松林中:列蛾(7至8月)、泛壮鞘蛾与桃潜蛾(7月)和藜茎鞘蛾(8月)是 SBT 中特有的优势种;甘薯麦蛾、榄绿歧角螟、杨小舟蛾与白钩小卷蛾(7月)、异脉筛麦蛾、淡剑贪夜蛾与细条纹野螟(8月)是 MCT 中特有的优势种。另外,小菜蛾(6月)、黑白尖蛾与桃展足蛾(6至8月)在 SBT 中的优势度更高;旋幽夜蛾(6月)、槐尺蛾(6至7月)和槐叶柄卷蛾(6至8月)在 MCT 中的优势度更高。不同月份中,两种灯诱装置的优势种组成差异均显著($P<0.05$)。

不同林分中两种灯诱装置采集的蛾类优势种组成见表 3,优势种组成差异见表 4。

表 3 不同林分中两种灯诱装置采集蛾类优势种组成(相对多度%)

Table 3 Comparison of dominant species of moths collected by two light traps in different forest stands (relative abundance%)

科 Family	物种 Species	6 月 June		7 月 July		8 月 August	
		SBT	MCT	SBT	MCT	SBT	MCT
北京杨林 <i>Populus×beijingensis</i> forest							
尖蛾科 Cosmopterigidae	黑白尖蛾 <i>Labdia niphosticta</i>	5.30	—	6.79	—	5.78	—
列蛾科 Autostichidae	列蛾 <i>Autostincha</i> sp.	—	—	6.79	—	6.60	2.33
鞘蛾科 Coleophoridae	藜茎鞘蛾 <i>Coleophora serinipennella</i>	4.80	—	10.49	2.27	2.97	—
织蛾科 Oecophoridae	双线织蛾 <i>Promalactis</i> sp.	5.81	2.97	—	—	—	—
	桃展足蛾 <i>Stathmopoda auriferella</i>	1.26	—	5.56	3.17	—	—
尺蛾科 Geometridae	槐尺蛾 <i>Semiothisa cineraria</i>	0.76	3.20	—	4.08	—	—
细蛾科 Gracillariidae	杨银叶潜蛾 <i>Phyllocnistis saligna</i>	0.76	—	—	—	—	—
目夜蛾科 Erebiidae	窄肾长须夜蛾 <i>Herminia stramentacealis</i>	—	—	—	—	8.91	7.21
夜蛾科 Noctuidae	委夜蛾 <i>Athetis furvula</i>	—	—	—	—	13.53	12.10
	二点委夜蛾 <i>Athetis lepigone</i>	—	1.19	—	—	—	—
	旋幽夜蛾 <i>Hadula trifolii</i>	5.56	8.19	—	—	—	—
	标瑯夜蛾 <i>Maliattha signifera</i>	—	—	2.47	—	15.35	15.05
	甘蓝夜蛾 <i>Mamestra brassicae</i>	—	—	—	—	—	3.26
	乏夜蛾 <i>Niphonyx segregata</i>	—	—	12.35	9.30	3.47	6.83
	八字地老虎 <i>Xestia c-nigrum</i>	—	—	—	2.49	—	—
舟蛾科 Notodontidae	杨小舟蛾 <i>Micromelalopha sieversi</i>	—	—	—	2.72	—	—
草螟科 Crambidae	白点暗野螟 <i>Bradina atopalis</i>	—	—	18.52	26.98	—	—
	褐萍水螟 <i>Elophila turbata</i>	—	—	—	—	—	2.25
	玉米螟 <i>Ostrinia furnacalis</i>	—	1.19	—	—	—	—
	细条纹野螟 <i>Tabidia strigiferalis</i>	—	2.49	—	—	—	2.56
	二点织螟 <i>Aphomia zelleri</i>	52.27	68.09	—	6.80	2.64	4.58
螟蛾科 Pyralidae	圆斑栉角斑螟 <i>Ceroprepes ophthalmicella</i>	—	—	3.09	—	—	—
	巴塘暗斑螟 <i>Euzophera batangensis</i>	—	—	—	2.27	—	—
	夜斑螟 <i>Nyctegretis</i> sp.	—	—	—	—	2.97	4.03
	柳阴翅斑螟 <i>Sciota adelphella</i>	1.01	1.19	3.09	2.95	—	—
	槐叶柄卷蛾 <i>Cydia trasias</i>	—	—	—	—	2.48	—
卷蛾科 Tortricidae	白钩小卷蛾 <i>Epiblema foenella</i>	—	—	—	2.27	—	—
	杨柳小卷蛾 <i>Gypsonoma minutana</i>	1.01	1.42	6.79	—	—	—
菜蛾科 Plutellidae	小菜蛾 <i>Plutella xylostella</i>	16.16	3.08	—	—	2.48	—
合计 Sum		94.70	93.00	75.93	65.31	67.16	60.20
油松林 <i>Pinus tabuliformis</i> forest							
尖蛾科 Cosmopterigidae	黑白尖蛾 <i>Labdia niphosticta</i>	18.85	7.00	4.83	—	3.40	—
列蛾科 Autostichidae	列蛾 <i>Autostincha</i> sp.	—	—	21.26	—	6.37	—
麦蛾科 Gelechiidae	异脉筛麦蛾 <i>Ethmiopsis prosectrix</i>	—	—	—	—	—	2.48
	甘薯麦蛾 <i>Helcystogramma triannulella</i>	—	—	—	2.36	—	—
鞘蛾科 Coleophoridae	藜茎鞘蛾 <i>Coleophora serinipennella</i>	—	—	—	—	6.58	—

续表

科 Family	物种 Species	6 月 June		7 月 July		8 月 August	
		SBT	MCT	SBT	MCT	SBT	MCT
织蛾科 Oecophoridae	泛壮鞘蛾 <i>Coleophora versurella</i>	—	—	3.86	—	—	—
	双线织蛾 <i>Promalactis</i> sp.	4.10	3.56	—	—	—	—
	桃展足蛾 <i>Stathmopoda auriferella</i>	9.02	5.58	6.28	2.36	7.86	—
尺蛾科 Geometridae	槐尺蛾 <i>Semiothisa cinerearia</i>	7.65	19.22	—	2.36	—	—
目夜蛾科 Erebiidae	窄肾长须夜蛾 <i>Herminia stramentacealis</i>	—	—	—	—	2.76	2.48
夜蛾科 Noctuidae	委夜蛾 <i>Athetis furvula</i>	—	—	—	—	12.10	10.64
	旋幽夜蛾 <i>Hadula trifolii</i>	3.01	6.05	—	—	—	—
	标瑯夜蛾 <i>Maliattha signifera</i>	—	—	7.25	8.45	8.49	9.41
舟蛾科 Notodontidae	乏夜蛾 <i>Niphonyx segregata</i>	2.73	—	5.80	6.76	—	2.48
	淡剑贪夜蛾 <i>Spodoptera depravata</i>	—	—	—	—	—	4.08
	杨小舟蛾 <i>Micromelalopha sieversi</i>	—	—	—	2.36	—	—
羽蛾科 Pterophoridae	甘薯异羽蛾 <i>Emmelina monodactyla</i>	3.28	2.49	—	—	—	—
草螟科 Crambidae	白点暗野螟 <i>Bradina atopalis</i>	—	—	5.80	4.39	—	—
	细条纹野螟 <i>Tabidia strigiferalis</i>	—	—	—	—	—	4.70
螟蛾科 Pyralidae	二点织螟 <i>Aphomia zelleri</i>	4.92	6.41	—	—	—	—
	微红梢斑螟 <i>Dioryctria rubella</i>	6.01	8.07	6.76	11.15	10.40	13.74
	榄绿歧角螟 <i>Endotricha olivacealis</i>	—	—	—	13.85	—	—
卷蛾科 Tortricidae	槐叶柄卷蛾 <i>Cydia trasias</i>	—	12.46	—	3.72	3.40	5.94
	白钩小卷蛾 <i>Epiblema foenella</i>	—	—	—	2.70	—	—
	松实小卷蛾 <i>Retinia cristata</i>	—	—	5.80	5.74	12.74	11.88
菜蛾科 Plutellidae	小菜蛾 <i>Plutella xylostella</i>	11.20	2.85	—	—	—	—
潜蛾科 Lyonetiidae	桃潜蛾 <i>Lyonetia clerkella</i>	—	—	5.31	—	—	—
合计 Sum		70.77	73.67	72.95	66.22	74.10	67.82

表 4 不同林分中两种灯诱装置采集蛾类优势种组成差异比较

Table 4 Comparison of dominant species composition of moths collected by two light traps in different forest stands

林分类型 Forest stand	月份 Month	χ^2	df	林分类型 Forest stand	月份 Month	χ^2	df
北京杨林	6 *	29.241	13	油松林	6 *	31.746	10
<i>Populus×beijingensis</i> forest	7 *	53.518	15	<i>Pinus tabuliformis</i> forest	7 *	65.188	15
	8 *	26.118	13		8 *	38.823	13

* 表示显著水平为 $P<0.05$, χ^2 表示卡方检验的值

3.2.2 共有种比例比较分析

在北京杨林中:6 月 SBT 的共有种比例平均为 46.46%, MCT 为 37.51%; 7 月 SBT 的共有种比例平均为 55.23%, MCT 为 27.22%; 8 月 SBT 的共有种比例平均为 73.85%, MCT 为 48.16%。在油松林中:6 月 SBT 的共有种比例平均为 64.40%, MCT 为 51.24%; 7 月 SBT 的共有种比例平均为 69.07%, MCT 为 48.64%; 8 月 SBT 的共有种比例平均为 68.11%, MCT 为 52.50% (图 3)。

在 6—8 月, SBT 的共有种比例始终更高, 这表明 MCT 采集的特有种数量更多。除 6 月份的北京杨林和 8 月油松林外, 两种灯诱装置的共有种比例均存在显著差异 ($P<0.05$)。

3.3 两种灯诱装置的蛾类物种多样性比较

在 6 月至 8 月, SBT 的三项物种多样性指数的变异系数总体上小于 MCT。丰富度指数 R 上: 在北京杨林中, MCT 的变异系数高出 SBT 5.53% 至 8.24%; 在油松林中, MCT 高出 1.67% 至 15.44%, 而在 6 月 SBT 的变异系数更高。多样性指数 H' 上: 在北京杨林中, MCT 的变异系数高出 SBT 5.12% 至 23.66%, 在 8 月两种灯诱装置的变异系数相近; 在油松林中, MCT 高出 4.05% 至 7.07%, 而在 6 月 SBT 的变异系数更高。均匀度指数 J 上: 在北京杨林中, MCT 的变异系数高出 SBT 3.94% 至 16.84%; 而在油松林中, SBT 的变异系数均大于 MCT (表 5)。

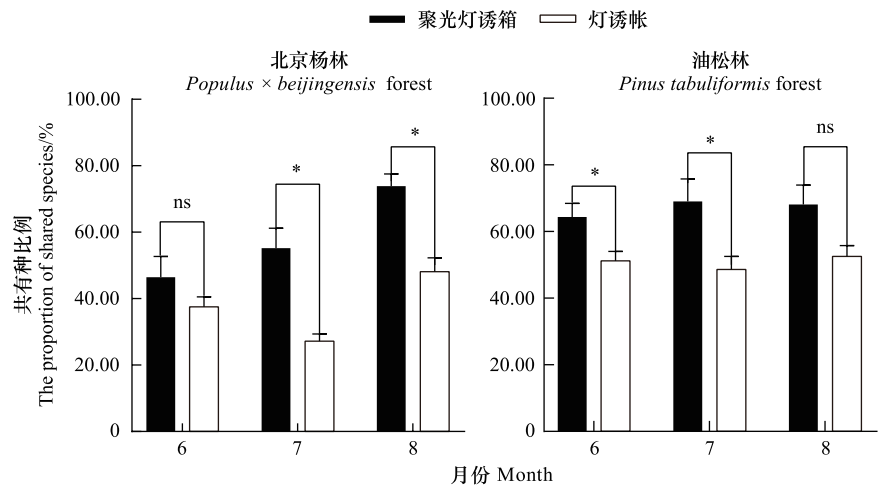


图3 不同林分中两种灯诱装置采集的蛾类共有种比例(均值±标准误)

Fig.3 The proportion of shared species of moths collected by two light traps in different forest stands (Mean±SE)

* 表示显著水平为 $P<0.05$

在不同林分中,两种灯诱装置的物种多样性指数差异的显著性呈现不同的规律:在北京杨林中,丰富度指数 R 在 7、8 月差异显著 ($P<0.05$),多样性指数 H' 在 8 月差异显著 ($P<0.05$),均匀度指数 J 差异均不显著。在油松林中,6 月的均匀度指数 J 差异显著 ($P<0.05$),7 月的丰富度指数 R 和多样性指数 H' 差异显著 ($P<0.05$),其余月份均不显著。

表5 不同林分中两种灯诱装置采集蛾类物种多样性指数比较

Table 5 Comparison of species diversity index of moths collected by two light traps in different forest stands

林分类型 Forest stand	月份 Month	灯诱装置 Light traps	丰富度指数 R Richness index		多样性指数 H' Diversity index		均匀度指数 J Evenness index	
			均值±标准误 Mean ± SE	CV/%	均值±标准误 Mean ± SE	CV/%	均值±标准误 Mean ± SE	CV/%
北京杨林 <i>Populus×beijingensis</i> forest	6	SBT	3.019±0.145	14.46	1.692±0.021	3.67	0.621±0.014	6.54
		MCT	3.294±0.220	19.99	1.448±0.132	27.33	0.490±0.038	23.39
	7 ^a	SBT	4.271±0.121	8.53	2.529±0.018	2.18	0.876±0.004	1.31
		MCT	7.279±0.407	16.77	2.930±0.071	7.29	0.818±0.022	8.13
	8 ^{ab}	SBT	7.662±0.139	5.45	3.091±0.018	1.73	0.829±0.002	0.82
		MCT	10.533±0.338	9.63	3.334±0.017	1.52	0.803±0.013	4.75
油松林 <i>Pinus tabuliformis</i> forest	6 ^c	SBT	5.500±0.125	6.8	2.798±0.037	3.98	0.846±0.010	3.47
		MCT	5.923±0.052	2.63	2.678±0.019	2.11	0.757±0.002	0.65
	7 ^{ab}	SBT	4.489±0.210	14.04	2.610±0.025	2.85	0.878±0.011	3.61
		MCT	5.952±0.312	15.72	2.885±0.066	6.9	0.867±0.006	2.11
	8	SBT	5.896±0.200	10.18	2.904±0.010	1.07	0.853±0.011	3.71
		MCT	7.129±0.609	25.62	2.982±0.081	8.14	0.813±0.001	0.34

abc 表示物种多样性指数差异是否显著,a 表示丰富度指数 R ,b 表示多样性指数 H' ,c 表示均匀度指数 J ,显著度设定 $P<0.05$

3.4 两种灯诱装置的蛾类形态参数比较

根据同一林分的三块样地中,所有采集物种的加权平均值的计算结果,对采集的蛾类形态参数进行比较。结果表明,在北京杨林中,MCT 采集的蛾类体长是 SBT 的 1.21 倍,在油松林中为 1.19 倍,即 MCT 采集蛾类物种的体型更大;此外在北京杨林中,MCT 采集的蛾类胸宽为 1.37 倍,前翅长是 SBT 的 1.22 倍,翅负载为 1.19 倍;在油松林中,MCT 采集的蛾类胸宽为 1.36 倍,前翅长是 SBT 的 1.21 倍,翅负载为 1.21 倍,这表明 MCT 采

集蛾类物种的单次飞行能力更强^[25](图4)。不同林分中,MCT的四项形态参数均显著高于SBT($P<0.05$)。

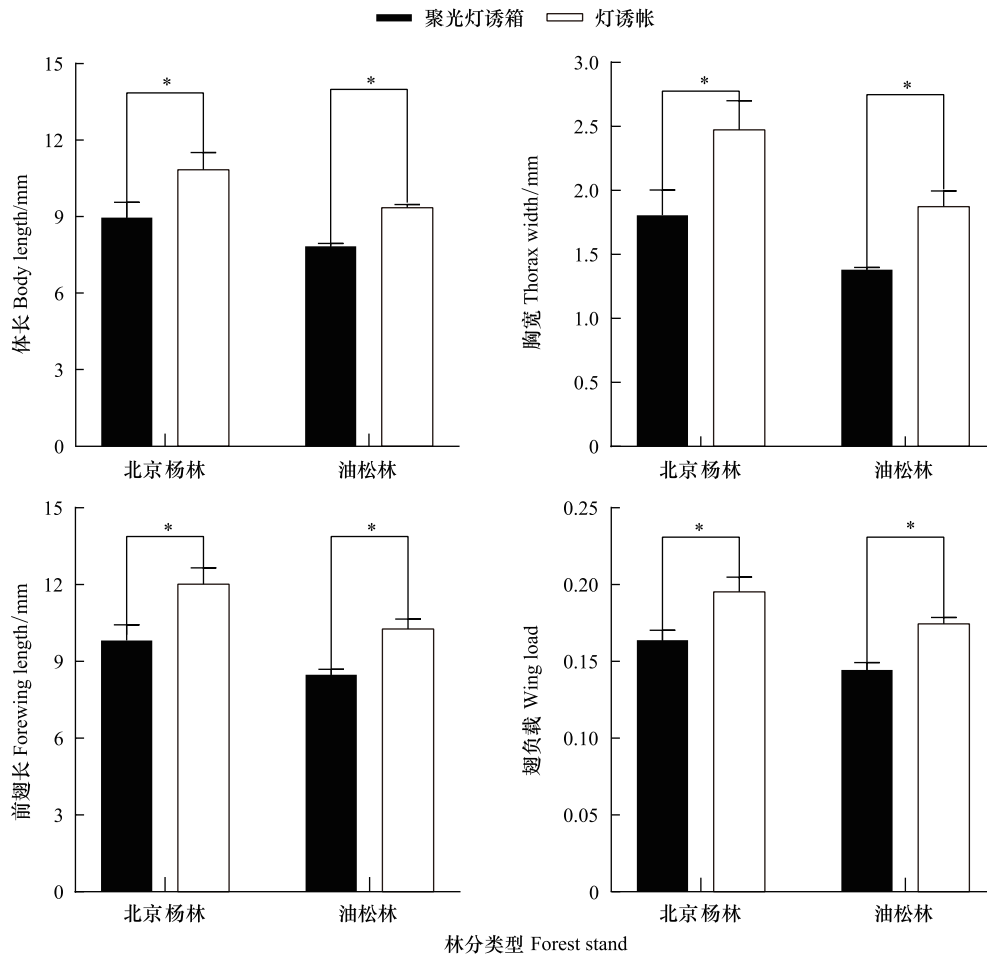


图4 不同林分中两种灯诱装置采集蛾类物种的形态参数比较(均值±标准误)

Fig.4 Comparison of morphological parameters of moth species collected by two light traps in different forest stands (Mean±SE)

* 表示显著水平为 $P<0.05$

4 讨论与结论

昆虫采集是昆虫多样性调查与研究中最基础的工作。在国内,使用白色幕布与灯诱帐的传统灯诱法仍然是大多数昆虫多样性调查中常用的采集方法,而在国外,操作更统一、数据比较性更强的自动诱虫灯 (Automatic light traps)^[27-28]已经得到了普遍的应用。总体上,当研究目的为采集多样化的物种用于本底调查或区系研究时,传统灯诱法即可满足需要^[28];而在生态学研究,采集方法的标准化的不同采样点间数据具有比较性的前提^[17-18],因此可自动采集的灯诱装置在应用上更具科学性。

本研究使用的聚光灯诱箱,是基于传统灯诱法与国外昆虫采集中常用的 Robinson trap 的特征设计制作的自动灯诱装置,为增加对目标林分评价的可靠性,该装置使用遮光灯罩控制水平方向上的灯光照射范围。光源是影响灯光诱虫效率的主要因素^[29-30],本研究的对比试验中,灯诱帐所采集的蛾类物种数量与个体数量均高于聚光灯诱箱。由于二者的灯泡规格一致,因此认为光域(灯光照射范围)是主要影响因素,即在水平方向上,更大的诱集范围提升了蛾类的采集数量,这与传统灯诱法自身灯诱装置的优势相符。但如前文中所述,单体采集数量的最大化并非昆虫多样性调查与监测的主要目标,通过比较标准误与变异系数发现,在同一林分中,总体上聚光灯诱箱具有更低的采样误差,调查数据相较于传统灯诱法具有更高的稳定性,更能满足昆虫

多样性的研究需要。

林分类型是影响昆虫群落物种组成与多样性的主要因素之一^[8-10],作为生态系统中的生产者,不同树种与林下植被在食物与栖息地类型上,直接影响昆虫的物种组成与分布。本研究选择通州区城市人工林中的两种常见林分进行了蛾类群落调查,同一林分中,不同灯诱装置采集的蛾类优势种组成存在显著差异。优势种作为反映生物群落结构特征的重要内容,这一结果表明灯诱装置本身的特征影响了所采集蛾类的物种组成。具体表现在两种灯诱装置的共有种比例上:同一林分的不同样地间,聚光灯诱箱的共有种比例高于灯诱帐,这表明后者采集的特有种数量更多,由于灯诱帐的光域不受控制,其采集的特有种更可能来自装置所在林班外的其它林分中。因此我们认为相较于传统的灯诱方法,聚光灯诱箱的采集结果对其所在的林分具有更好的代表性。

物种多样性指数是描述昆虫群落特征的常用指标^[5,7,14],其数据的可靠性将影响昆虫多样性评价结果的可靠性。在本研究中,北京杨林的三项物种多样性指数的标准误与变异系数,使用聚光灯诱箱的数据误差总体上低于传统灯诱法,仅在物种丰富度整体较高的 8 月份出现了相近的情况。而在油松林中,聚光灯诱箱的采样数据的稳定性不再呈现一致的规律,在部分月份与指数类型(如均匀度指数 J)上,传统灯诱法的采集效果同样具有一定的稳定性。这表明研究区域中,油松林过于密集的栽植方式在一定程度上消减了灯诱装置的透光效果,并对灯诱帐的诱集范围起到控制作用,从而提升了物种多样性指数数据的稳定性。这一现象说明,不同林分自身的特征将影响灯诱装置的诱集效果,从而对样本采集的结果产生影响。

在采集蛾类的形态上,传统灯诱法采集的蛾类群落具有更高的参数值,其中前翅长、胸宽和翅负载等参数与蛾类单次飞行的速度与持久力之间存在显著的正相关性^[25-26]。因此使用传统灯诱法采集的蛾类,整体上具有更大的体型与更强的单次飞行能力,这使得该类物种在灯诱帐上更容易被人工采集,也更可能在样地林班以外的区域中被散射的灯光诱集到灯诱帐的幕布上。这与两种灯诱装置采集蛾类的优势种组成相符:总体上在聚光灯诱箱中优势度较大的物种,如黑白尖蛾、列蛾、桃展足蛾和小菜蛾等,均为体型较小($<9\text{mm}$)的蛾类;而在灯诱帐中的优势度较大的物种,如甘蓝夜蛾、旋幽夜蛾、槐尺蛾和二点织螟等则体型相对较大($\geq 9\text{mm}$)。

本研究的样地位于北京市“平原百万亩造林工程”中的重点区域,属于城市人工林。相较于自然森林,城市人工林在林分结构上具有树种组成层次单一、乔木规格相近和林下植被稀疏等特点^[31-33];同时受人为活动与管理的影响,其森林斑块在景观上呈现出面积小、数量多、形状复杂的破碎化特征^[34-35],为其中的昆虫采样工作带来了独特的挑战与限制^[36]。本研究结果表明,聚光灯诱箱在块状混交的纯林中,相较于传统灯诱装置具有较好的采样效果,在样本数据的获取与分析结果上均表现出更高的可信度,该方法由于光域的可控性和采集昆虫的规范性,有助于精准开展针对特定林分昆虫多样性的研究,在森林生态系统的昆虫多样性调查与监测中具有更好的适用性与应用前景。近年来,在城市人工林与城市绿地等人工生态系统中,昆虫群落及多样性的研究在逐渐增加^[3,37-40]。在接下来的研究中,笔者团队将继续使用聚光灯诱箱作为昆虫采集装置,开展更多基于林分的昆虫多样性调查与评价实验与研究工作。

参考文献 (References):

- [1] Brown K S. Diversity, disturbance, and sustainable use of Neotropical forests: insects as indicators for conservation monitoring. *Journal of Insect Conservation*, 1997, 1(1): 25-42.
- [2] Barton P S, Evans M J. Insect biodiversity meets ecosystem function: differential effects of habitat and insects on carrion decomposition. *Ecological Entomology*, 2017, 42(3): 364-374.
- [3] Landsman A P, Ladin Z S, Gardner D, Bowman J L, Shriver G, D'Amico V, Delaney D A. Local landscapes and microhabitat characteristics are important determinants of urban-suburban forest bee communities. *Ecosphere*, 2019, 10(10): e02908.
- [4] Samways M J. Insects in biodiversity conservation: some perspectives and directives. *Biodiversity and Conservation*, 1993, 2(3): 258-282.
- [5] 马玲, 闫荣荣, 焦玥, 刘雪英, 张静, 刘哲强, 顾伟, 满子源, 张曼胤. 小兴安岭不同林型的昆虫多样性. *林业科学*, 2016, 52(2): 82-90.
- [6] 李志刚, 张碧胜, 翟欣, 龚鹏博, 黄宁生, 匡耀求, 郭明昉, 韩诗畴. 广州不同生境类型区域昆虫多样性. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 357-362.

- [7] 邹言, 刘佳文, 李立坤, 肖子衿, 陈法军. 北京市延庆区不同生境昆虫多样性特征调查分析. 应用昆虫学报, 2020, 57(5): 1161-1172.
- [8] 高宝嘉. 雾灵山森林植物与节肢动物群落结构及多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [9] 吴龙飞, 姜文虎, 刘洋, 李忠玲, 刘军侠. 不同林分类型对昆虫群落多样性的影响. 生态学报, 2017, 37(7): 2217-2224.
- [10] Tyler T. Relationship between moth (night active Lepidoptera) diversity and vegetation characteristics in southern Sweden. Journal of Insect Conservation, 2020, 24(6): 1005-1015.
- [11] 滕备, 杨海东, 佟一杰, 梁敏轩, 张嘉康, 李英铭, Benoît Guénard, 白明. 三种被动式采集方法对甲虫收集效果的比较研究: 以香港城门样地为例. 生物多样性, 2021, 29(10): 1386-1395.
- [12] Muirhead-Thomson R C. Trap responses of flying insects: the influence of trap design on capture efficiency. London: Academic, 1991: 2-65.
- [13] 邹言, 刘佳文, 李立坤, 曾路影, 陈法军. 北京市珍珠泉乡不同昆虫采集方法采集效果对比分析. 环境昆虫学报, 2021, 43(3): 758-767.
- [14] 问荣荣, 马玲, 刘哲强, 焦玥, 顾伟, 满子源, 刘雪英. 小兴安岭森林恢复期不同植被区域蛾类组成及其多样性. 生态学报, 2016, 36(15): 4816-4823.
- [15] 唐慎言, 潘昭, 任卫红, 项亚飞, 孟祥普, 王圆圆, 任国栋. 河北雾灵山森林景观蛾类组成与多样性分析. 河北大学学报: 自然科学版, 2017, 37(1): 62-70.
- [16] Intachat J, Woiwod I P. Trap design for monitoring moth biodiversity in tropical rainforests. Bulletin of Entomological Research, 1999, 89(2): 153-163.
- [17] Beck J, Linsenmair K E. Feasibility of light-trapping in community research on moths: attraction radius of light, completeness of samples, nightly flight times and seasonality of Southeast-Asian hawkmoths (Lepidoptera: Sphingidae). The Journal of Research on the Lepidoptera, 2006, 39: 18-36.
- [18] Merckx T, Slade E. Macro-moth families differ in their attraction to light: implications for light-trap monitoring programmes. Insect Conservation and Diversity, 2014, 7(5): 453-461.
- [19] Infusino M, Brehm G, di Marco C, Scalercio S. Assessing the efficiency of UV LEDs as light sources for sampling the diversity of macro-moths (Lepidoptera). European Journal of Entomology, 2017, 114: 25-33.
- [20] Dar A A, Jamal K. Moths as ecological indicators: a review. Munis Entomology and Zoology Journal, 2021, 16(2): 830-836.
- [21] Uhl B, Wölfling M, Fiedler K. Qualitative and quantitative loss of habitat at different spatial scales affects functional moth diversity. Frontiers in Ecology and Evolution, 2021, 9: 637371.
- [22] 张梦迪, 张芬, 李雄. 基于 InVEST 模型的生境质量评价——以北京市通州区为例. 风景园林, 2020, 27(6): 95-99.
- [23] 王剑峰, 逢金涛, 韩锦涛, 张旭, 董慧萌. 四种常用昆虫采集毒瓶试剂对黑腹果蝇毒杀效果. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2015, 27(2): 126-129.
- [24] Pinksen J, Moise E, Sircom J, Bowden J J. Living on the edge: effects of clear-cut created ecotones on nocturnal macromoth assemblages in the eastern boreal forest, Canada. Forest Ecology and Management, 2021, 494: 119309.
- [25] 刘豪. 部分蛾类成虫形态参数与飞行能力相关性分析[D]. 新乡: 河南科技学院, 2021.
- [26] Beck J, Kitching I J. Correlates of range size and dispersal ability: a comparative analysis of sphingid moths from the Indo-Australian tropics. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16(3): 341-349.
- [27] Brehm G, Axmacher J C. A comparison of manual and automatic moth sampling methods (Lepidoptera: Arctiidae, Geometridae) in a rain forest in Costa Rica. Environmental Entomology, 2006, 35(3): 757-764.
- [28] Axmacher J C, Fiedler K. Manual versus automatic moth sampling at equal light sources - A comparison of catches from Mt. Kilimanjaro. Journal of the Lepidopterists Society, 2004, 58(4): 196-202.
- [29] 赵建伟, 何玉仙, 翁启勇. 诱虫灯在中国的应用研究概况. 华东昆虫学报, 2008, 17(1): 76-80.
- [30] 王一. 马氏网与诱虫灯对昆虫多样性动态监测效果的比较[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [31] 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.
- [32] 梁璇, 刘萍, 徐正春, 梁倩玲. 不同类型城市森林的林下植物多样性研究. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 69-73.
- [33] 马杰, 贾宝全, 张文, 刘秀萍, 李晓婷, 刘佳. 北京市六环内城市森林结构总体特征. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2318-2325.
- [34] 吴丽娟. 北京城市绿地景观格局与生物多样性保护研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [35] 鲁敏, 罗晓楠, 王永华, 高鑫, 刘国恒. 济南城市森林景观生态格局. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4117-4126.
- [36] Waite E M, Closs G, Van Heezik Y, Berry C, Dickinson K. Arboreal arthropod sampling methods for urban trees. Journal of Insect Conservation, 2012, 16(6): 931-939.
- [37] 罗昕裕, 周昭敏. 3 种城市生境间蚂蚁群落组成的比较研究——以四川省南充市城区为例. 四川动物, 2020, 39(2): 148-155.
- [38] Koneri R, Maabuat P V, Nangoy M J. The distribution and diversity of butterflies (Lepidoptera: Rhopalocera) in various urban forests in North Minahasa Regency, North Sulawesi Province, Indonesia. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18(2): 2295-2314.
- [39] Tamara M E L, Latty T, Threlfall C G, Hochuli D F. Major insect groups show distinct responses to local and regional attributes of urban green spaces. Landscape and Urban Planning, 2021, 216: 104238.
- [40] 杨欢, 杨焮, 曹雯星, 张韬, 顾俊杰, 岳艳丽. 城市绿地昆虫群落结构及多样性--以成都市为例. 环境昆虫学报, 2022, 44(5): 1071-1087.