DOI: 10.20103/j.stxb.202305120996
王立雄,黄博超,刘刚,于娟,郝庆丽,杨萌,陶然.城市绿地生态保护视角昆虫光谱趋性差异.生态学报,2024,44(8):3348-3359.
Wang L X, Huang B C,Liu G,Yu J,Hao Q L,Yang M,Tao R.Differences in insect spectral tropism from the perspective of urban green space ecological protection.Acta Ecologica Sinica,2024,44(8):3348-3359.

城市绿地生态保护视角昆虫光谱趋性差异

王立雄[1,2],黄博超[1,2],刘　刚[1,2],于　娟[1,2,3],郝庆丽[1,2,*],杨　萌[1,2],陶　然[4]
1 天津大学建筑学院,天津　300072
2 天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室,天津　300072
3 济南大学土木建筑学院,济南　250022
4 济南市城乡规划编制研究中心,济南　250000

摘要:照明提升城市夜间安全与活力,是城市建设的重要因素。但近年来夜间照明的迅速蔓延,改变了城市自然环境的光周期与光分布范围,造成光污染生态风险。其中,趋光昆虫受到的胁迫尤为显著,城市绿地昆虫种类与数量急剧下降,进而通过级联效应,引发城市绿地生态系统失衡问题。昆虫是典型的生态指示种和光敏动物,明确昆虫的光谱趋性差异,筛选出对昆虫趋光性友好的光谱,可为生态光源的研发提供依据,从而降低城市照明的生态风险。已有研究较多采用实验室内实验箱的设置方法,探究某一特定昆虫属种的趋光行为,尚缺乏对特定生境下的昆虫群落和典型昆虫目的光谱趋性研究。因此,研究在天津市津南区天津大学北洋园校区绿地系统开展野外人工光诱捕昆虫实验,以野外诱捕昆虫的种类与数量为判定依据,分析各光谱的昆虫趋性差异。野外诱虫实验以 7 种窄光带光谱(单色光)为研究对象,采用相对评价法,设置趋光昆虫最敏感的紫外光(Ultraviolet,369 nm)为对照组。结果表明,天津城市绿地生境中,4 类典型趋光昆虫为双翅目(61.1%)、半翅目(19.7%)、鞘翅目(11.1%)、鳞翅目(5.7%)类,占诱捕总量的 97.6%;对照紫外光(Ultraviolet,369 nm),4 种典型昆虫总体的趋性敏感光谱排序及趋性概率为:远红色光(Far Red,740 nm)0.5%<深红色光(Deep Red,660 nm)2.0%<橘红色光(Red Orange,627 nm)9.0%<青色光(Cyan,500 nm)22.8%<绿色光(Green,519 nm)22.9%<蓝紫色光(Royal Blue,447 nm)27.6%<蓝色光(Blue,478 nm)40.1%;绝对生态光谱为红光,相对生态光谱为青色光(Cyan,500 nm)和蓝紫色光(Royal Blue,447 nm)。在全面推进人与自然和谐共生的现代化建设阶段,研究将有助于生态光源的开发、生态保护和城市光生态建设的提升。

关键词:生态保护;发光二极管光谱;城市绿地昆虫;趋光性

Differences in insect spectral tropism from the perspective of urban green space ecological protection

WANG Lixiong[1,2], HUANG Bochao[1,2],LIU Gang[1,2],YU Juan[1,2,3],HAO Qingli[1,2,*],YANG Meng[1,2],TAO Ran[4]
1 *School of Architecture, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*
2 *Tianjin Key Laboratory of Building Physical Environment and Ecological Technology, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*
3 *School of Civil Engineering and Architecture, Jinan University, Jinan* 250022, *China*
4 *Jinan Urban and Rural Planning Research Center, Jinan* 250000, *China*

Abstract: Lighting enhances the safety and vitality of the city at night and is an important factor in urban construction. However, in recent years, the rapid spread of night lighting has changed the photoperiod and light distribution range of the urban natural environment, causing the ecological risk of light pollution. Among them, phototaxis insects are particularly stressed, and the species and number of insects in urban green space decrease sharply, which leads to the imbalance of

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978453);上海市科学技术委员会项目(22DZ1202400,22DZ1202404)
收稿日期:2023-05-12;　　**网络出版日期**:2024-01-29
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qingli_h@163.com

urban green space ecosystem through cascading effects. Insects are typical ecological indicator species and photosensitive animals. Clarifying the difference of spectral taxis of insects and screening out the spectrum friendly to insect phototaxis can provide a basis for the research and development of ecological light sources, so as to reduce the ecological risk of urban lighting. Many studies have used the setting method of laboratory chamber to explore the phototaxis of a specific insect species, but there is a lack of spectral taxis of insect communities and typical insect targets in specific habitats. Therefore, this study carried out field experiments on artificial light trapping of insects in the green space system of Tianjin University Beiyangyuan Campus, Jinnan District, Tianjin, and analyzed the differences of insect taxis in various spectra based on the species and quantity of insects trapped in the field.In the field insect trapping experiment, seven kinds of narrow band light (monochromatic light) were used as the research object, and Ultraviolet light (369 nm), the most sensitive light of phototropic insects, was set as the control group by relative evaluation method. The results showed that the four typical phototropic insects were Diptera (61.1%), Hemiptera (19.7%), Coleoptera (11.1%) and Lepidoptera (5.7%), accounting for 97.6% of the total trapping. Compared with Ultraviolet (369 nm), the overall taxotaxis sensitivity spectrum ordering and taxotaxis probability of the four typical insects are as follows: Far Red light (Far Red, 740 nm) 0.5%<Deep Red light (Deep Red, 660 nm) 2.0%<Red Orange light (Red Orange, 627 nm) 9.0%<Cyan light (Cyan, 500 nm) 22.8%<Green light (Green, 519 nm) 22.9%<Royal Blue light (Royal Blue, 447 nm) 27.6%<Blue light (Blue, 478 nm) 40.1%. The absolute ecological spectrum was red light, and the relative ecological spectrum was Cyan light (Cyan, 500 nm) and Royal Blue light (Royal Blue, 447 nm). In the modernization construction stage of harmonious coexistence between humans and nature, this study will contribute to the development of ecological light source, ecological protection and the improvement of urban light ecological construction.

Key Words: ecological protection; LED spectrum; urban green space insects; phototaxis

城市照明的迅速蔓延所产生的人工光污染,改变了自然光环境的固有属性(光周期、光谱与光强、光分布范围等)[1—2]。昆虫普遍具有趋光性,许多昆虫特别是一些夜行性昆虫,对人造光表现出正趋光性。昆虫被人工光吸引,改变原始觅食等活动路径,最终会因能量枯竭或被天敌捕食而死。人工光污染已造成昆虫多样性和种群数量的锐减[3—4]。昆虫物种持久性和多样性,是生态系统平衡与可持续发展的重要内容。昆虫多样性受到严重破坏,极大地威胁了自然生态系统的平衡[5]。因此,探索人工光对昆虫趋性的影响规律对保护生态具有重大意义。

生物学和农林学研究证明,趋光昆虫具有显著的光谱趋性差异[6],这种特性广泛应用在防治消灭病虫害或监测农田益虫层面:查玉平等研究不同波长的发光二极管(LED)对成虫趋光行为的影响,为研发专用 LED 诱虫灯提供科学依据[7]。何旭栋等设计了一种多光谱诱虫实验装置,探究多波长单色光源对实验昆虫的趋光性实验研究[8]。此外,有研究采用成虫趋光反应行为试验箱,测定 14 种单色光波 LED 灯下、不同试虫密度下及不同光强下黏虫的趋光行为波长、密度和光强对黏虫趋光行为的影响[9]。这类研究以实现昆虫诱捕为最终目的。因此,研究成果多为“吸引”昆虫的人工光谱特性[10—11],例如,棉铃虫成虫对 333—383 nm 的紫外光、400—450 nm 的紫色光和 525—538 nm 的绿色光具有明显的趋性[12];中华通草蛉对 400 nm 的紫色光、460 nm的蓝色光、380 nm 紫外光和 562 nm 的绿色光趋性较强[13]。目前尚未明确趋光昆虫敏感性较弱的、“趋光友好”的光谱特性与波段。

学者们已意识到定制光谱以减少已知的生态影响研究的重要性[14—18]。在光谱结构的转变对昆虫行为影响的国内外相关研究中[19],多采用实验室内实验箱的设置,探究某一特定昆虫属种(例如黏虫)的趋光行为,尚缺乏对特定生境下的典型昆虫物种与物种多样性的光谱趋性研究,因而,无法为生态照明设计指导与光源研发提供量化依据。

城市绿地系统,是我国生态系统建设、生态城市建设的显著成果,也是昆虫物种多样性与人工照明光污染

矛盾最为突出的区域环境。昆虫的趋光反应也因昆虫种类和人工光属性而异,人工光的波长是决定昆虫行为光反应水平的关键因素。绿地生态系统中的昆虫是食物网中重要的组成部分,分为以植物为食的昆虫和以昆虫为食的昆虫,保证两者的动态平衡是维持生态系统平衡的重要保障。并且,98%以上种类的昆虫是对人类有益或者是中性的[20],是生态系统中的重要功能类群。为了保护生态系统平衡和生物多样性,有必要开展围绕城市绿地的室外照明对昆虫多样性的影响研究。基于研究目的,借鉴已有研究[21—22],面向昆虫主要类群,本研究从昆虫“目”的维度开展人工光对城市绿地昆虫多样性的影响研究,探究昆虫群落和类群在人工光暴露下的生态保护研究,为营造和谐生态城市提供基础科学依据。

本研究在生态保护视角下,以筛选“趋光友好”光谱为目标,聚焦城市绿地系统,以天津为例,在野外实验条件下,探究城市绿地生境下趋光昆虫的种群数量的基础数据,建立光谱与趋光昆虫种群数量之间的量化关系,旨在利用昆虫的光谱趋性差异,以昆虫趋光性友好光谱的生态光源应用与生态照明设计,促进昆虫物种的生态保护,降低城市照明光污染的生态风险,助力城市生态系统建设。

1 材料与方法

昆虫诱捕种类与数量,受很多因素的干扰,如天气、风速、气温等,因此存在系统误差而产生日间差异。为排除日间差异误差干扰,特别设置趋光昆虫最敏感的紫外光为对照组,以紫外光昆虫诱捕数量为基准,计算昆虫光谱趋性概率 K,分析光谱趋性差异。即 $K = N_x/N_{UV}$,其中 K 为昆虫光谱趋性概率,N_x 为 x 光谱诱捕昆虫数量,N_{UV} 为紫外光诱捕昆虫数量。

前期调研发现,实验场地的人流量、人员停留时间、人员距场地中心距离等是昆虫数量的干扰因素。故限定实验场地为轻度人工干扰度,具体筛选为郊野城市绿地:人工化程度较弱,自然程度较强,生态系统尚未被光污染胁迫,昆虫数量种类尚趋近于自然水平,但城市照明建设迅速,存在较大光生态隐患。

1.1 实验场地概况

实验场地的选址在湖畔水景式城市绿地生态片区,该片区占地 2.5 km^2,绿化率为 35.0%,水系覆盖率为 11.9%。在此范围内,选取水边、草地、林地三个生境作为实验场地,在类型上满足城市绿地的典型生境特征且面积大小相近。为避免实验场地之间的相互干扰,测试点之间的直线距离均大于 100 m[23],如图 1 所示:水边与草地测试点间距 150 m,草地与林地测试点间距 270 m,林地与水边测试点间距 310 m。此外,测试点远离现有光源(约 15—20 m),且实验开展期间,现有光源一直处于关闭状态,因此测试点未暴露在现有环境的直接人工照明下。测试点区域的植物种类丰富,植物空间配置疏密有致。如表 1 所示。

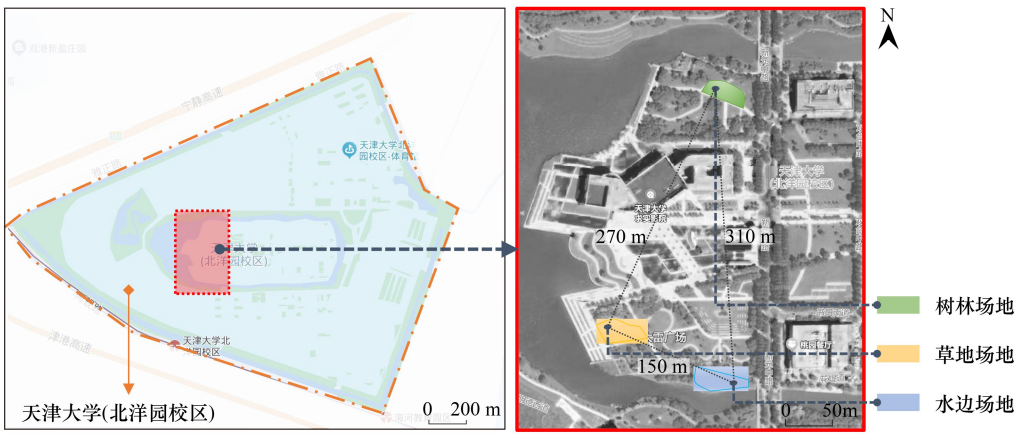

图 1 场地位置示意图

Fig.1 Site location diagram

表 1　测试点区域植物种类汇总表

Table 1　Summary of plant species in the test site area

场地类型 Site types	测试点植物种类 Test site plant species	测试点周边植物种类 Test the plant species around the site
水边 Water area	芦苇	桃树+榆树+垂柳+油松+旱柳+芦苇+莎草+荇菜+蓟+标准草坪
林地 Forest land	海棠树	海棠+桃树+白蜡+紫荆+楝树+苣荬菜+马唐+标准草坪
草地 Grass land	标准草坪	紫叶李+梓树+小檗+紫薇+构树+梣叶槭+石榴+八宝景天+狗尾草+喇叭花+蒲公英+苦荬菜+标准草坪

1.2　实验变量设置

1.2.1　光谱

选取城市照明常用的 7 种窄带光(单色光),并设置趋光昆虫最敏感的紫外光为对照组。灯具信息及光谱图如表 2 和图 2 所示。

表 2　实验灯具信息表

Table 2　Experimental lamp information sheet

实验灯具类型 Experimental luminaire types	光谱颜色/色温 Spectral color/color temperature	波长峰值 Wavelength peak/nm
窄带单色光发光二极管(LED)	蓝紫色光	447
Narrow band monochromatic light LED	蓝色光	478
	青色光	500
	绿色光	519
	橘红色光	627
	深红色光	660
	远红色光	740
紫外灯 Ultraviolet lamp	紫外光	369

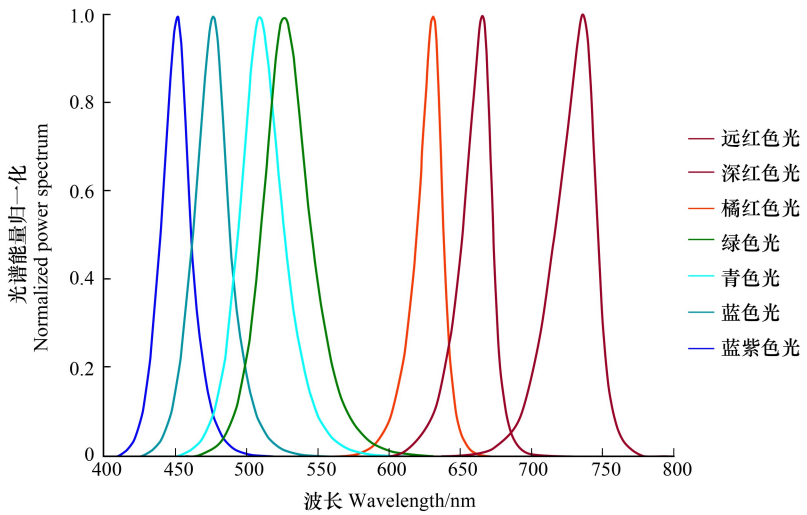

图 2　7 种单色 LED 灯具光谱

Fig.2　Spectrum of 7 monochrome LED luminaires

LED: 即发光二极管 Light emitting diode

1.2.2　光强

野外实验的光强数值设置,以天津市典型城市绿地生境的光环境辐照度为标准依据。实地调研城市绿

地,共计获得 3 组绿地数据,如表 3 和图 3 所示。计算辐照度均值为 28.6 W/m^2。因此,野外诱捕实验的辐照度数值设置以 28.6 W/m^{2}为基准,上下浮动 0.5 W/m^2。

表 3 各测试点辐照度数值

Table 3 Irradiance value of each test point

测试点 Test points	各测点辐照度值/(W/m^2) Irradiance value of each measuring point									辐照度均值/(W/m^2) Mean irradiance
南翠屏公园 Nancuiping park	45.2	45.9	45.5	45.6	46.7	44.4	45.3	42.1	41.7	
水上公园 Aquatic park	14.9	11.3	10.6	13.4	25.6	27.4	33.5	31.3	35.0	28.6
奥体中心公园 Olympic sports center park	19.5	19.3	19.1	19.2	18.8	17.9	18.2	17.4	16.0	

图 3 典型绿地生境光环境辐照度测试点及调研照片

Fig.3 Test sites and survey photos of light environment irradiance of typical greenbelt habitats

1.3 实验仪器设置

实验装置及现场照片如图 4—图 6 所示。实验装置包括灯具、承载框架、昆虫粘板 3 个部分,其中灯具与

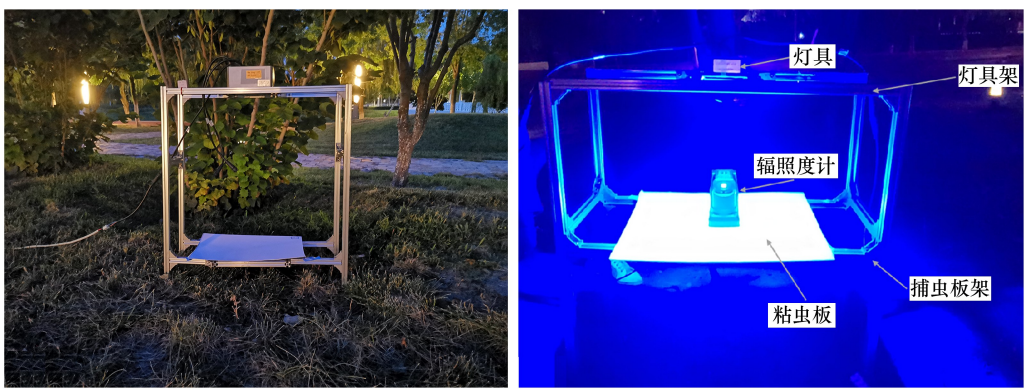

图 4 实验装置现场照片

Fig.4 Site photos of experimental equipment

粘板的距离为 50 cm。设置灯具之间的距离为 3 m,这一距离可排除实验光源之间的相互影响,并兼顾了实验场地的局限性[24]。采用 Mesh Lamp app 软件调控实验灯具的辐照度,利用 Konica Minolta CL-500A 分光辐射照度计测量粘虫板面辐照度。昆虫粘板定制尺寸为 A3。为避免粘板颜色和折射光对光谱的影响,选择白色的粘板进行实验。粘板相比于毒瓶类捕捉处理装置,易于统计体型较为微小的昆虫基本数量信息,并基本保持了其原始形态,减少后续昆虫分类的工作量与统计误差。

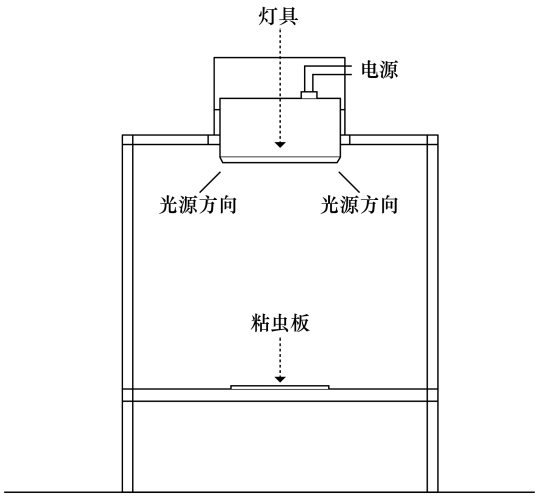

图 5　实验装置摆放示意图

Fig.5　Layout diagram of experimental device

1.4　实验条件设置

实验开展日期为 8 月 25 日至 9 月 9 日。由实地调研及预实验获知,天空光辐照度在晚间 20:00 后趋于稳定(太阳完全落下,路灯已完全亮起)。4 小时为常见昆虫捕捉时长[25],因此,野外诱捕实验时间范围为 20:00—24:00,共计 4 h。实验过程中为避免因已有昆虫太多导致无法粘住新昆虫的情况发生,每半小时更换一次粘虫板。

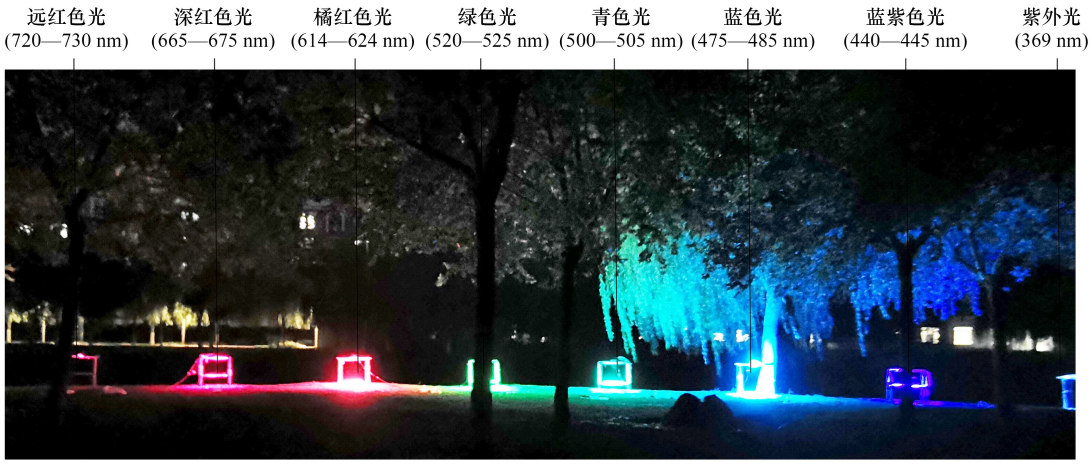

图 6　灯具装置位置示意图

Fig.6　Lighting installation location diagram

实验天气条件为无雨和风速< 12 英里/h。按照水边、林地、草地的顺序,以三天为一组实验,共进行四组实验。每个场地完成一次实验,间隔 3 天再继续实验,以保证一定程度上的生态修复。

1.5　数据分析

参考相关光阱研究,采用 OLYMPUS 奥林巴斯解剖镜进行昆虫样本的鉴定工作,按照“目”鉴别统计昆虫的整体数量与种类[26—31],如图 7 所示。本研究首先去掉极端值和异常值,利用 SPSS 21.0 统计软件对实验数据进行分析,方差分析显著性水平为 $\alpha = 0.05$。对不同光谱下的单色光数据进行 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验,以确定具体的数据描述方法。若不符合正态分布,使用非指数独立样本 Kruskal-Wallis 检验进行对比,来比较单色光数据在昆虫种类上和数量上是否存在差异,如存在差异则进行相关性分析。

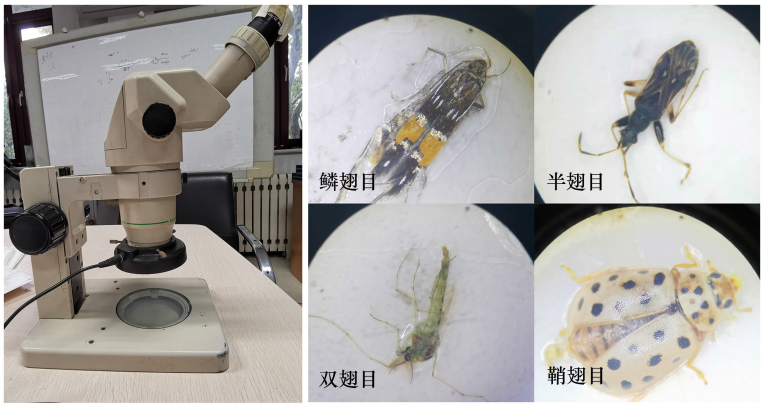

图 7 解剖镜和解剖镜下的各类昆虫

Fig.7 Anatomical mirrors and various insects under anatomical mirrors

2 结果与分析

实验共捕获 14 种“目”下的 45409 只昆虫,如图 8 所示。其中双翅目、半翅目、鞘翅目、鳞翅目 4 类昆虫受光吸引数量最多,占比分别是 61.1%、19.7%、11.1%、5.7%,共计占比 97.6%。下文对昆虫总体数量进行分析,以这四类昆虫为典型昆虫探究趋光昆虫的光谱差异性。

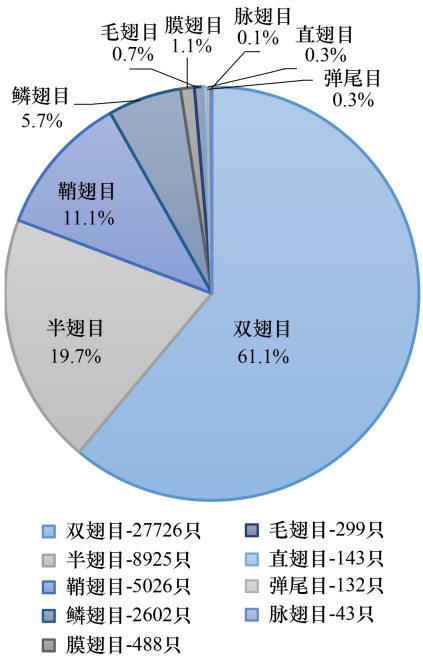

图 8 受光吸引昆虫种类数量及比例

Fig.8 Number and proportion of insect species attracted by light

2.1 不同光谱下的趋光昆虫数量与种类分析

对不同光谱吸引下的昆虫数据进行 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验结果显示,$P<0.05$,不符合正态分布。因此使用非指数独立样本 Kruskal-Wallis 检验进行对比,结果显示,$P<0.05$,即各个光谱下的数据有差异,因此可以对不同光谱吸引的昆虫数量进行相关性分析。

根据数据类型选择“按区间标定”相关性分析法,对光谱与昆虫数量之间的相关性进行分析。卡方检验 $P<0.05$,呈显著性相关,且光谱峰值波长和昆虫数量呈正相关关系。在设定光谱值时按照波长从长到短的顺序输入数据,即从 1 到 8 为远红色光(Far Red)到紫外光(Ultraviolet)灯。数据结果显示昆虫数量在总体上随着光谱峰值波长的减小而增加。

从总体上看,城市绿地趋光昆虫数量在总体上随着光源光谱峰值波长的减小而增长,长波长光谱的 Far Red (660 nm)与 Deep Red(740 nm)可认为是绝对生态光源。但绿色光与蓝色光波段数据结果,与总体趋势不同:波长较短的青色光(Cyan,500 nm)吸引数量少于绿色光(Green,519 nm)光源;波长较短的蓝紫色光(Royal Blue,447 nm)吸引数量少于蓝色光(Blue,478 nm)光源。即 Cyan(500 nm)与 Royal Blue(447 nm)可认为是相对生态光源,如图 9 所示。

三种实验场地下不同光谱下的数据如图 10 所示。从总体趋势上看,城市绿地受光吸引昆虫数量差异的总体趋势是草地场地数量>水边场地数量>树林场地数量。对 3 个实验场地下同一光谱吸引下的昆虫数据进行 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验结果显示,$P<0.05$,不符合正态分布。因此使用非指数独立样本 Kruskal-

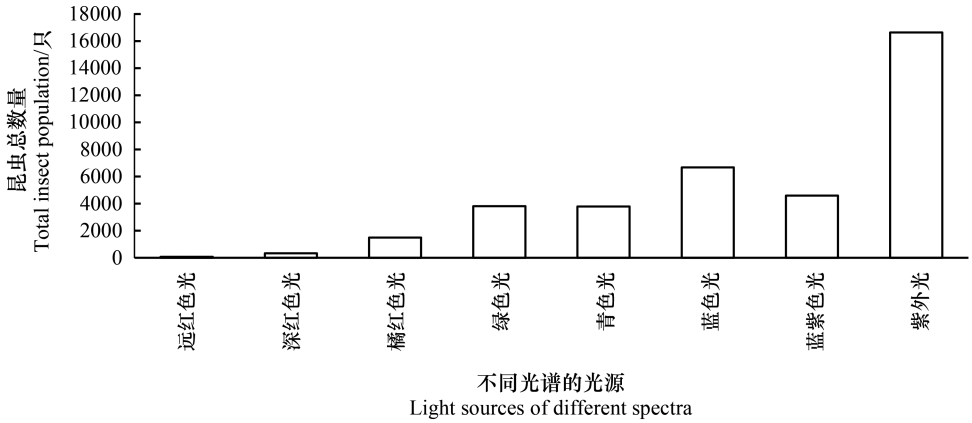

图 9　不同光谱光源吸引的昆虫总数量分布

Fig.9　The total number of insects attracted by different spectral light sources

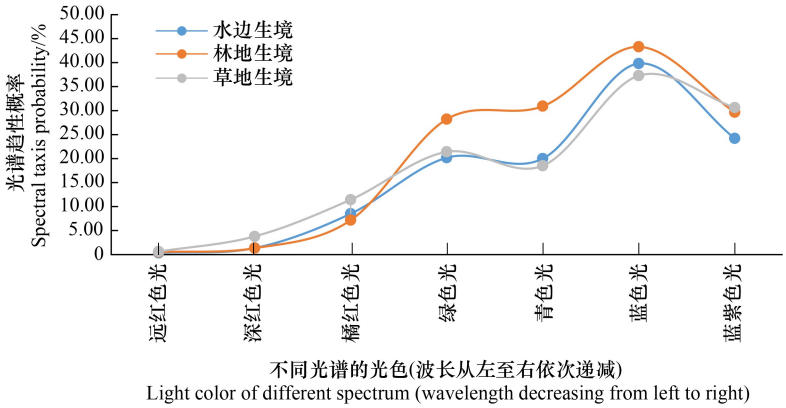

图 10　不同实验场地下的不同光谱趋性概率统计图

Fig.10　Spectral taxis probability statistical plots under different experimental sites

Wallis 检验进行对比,结果显示,$P>0.05$,即 3 个实验场地下同一光谱的数据无明显差异。

2.2　典型昆虫的光源光谱趋性差异分析

分别对四种典型昆虫在不同光源下的吸引数量,进行 Shapiro-Wilk 正态性检验,以确定具体的数据描述方法。四组数据的正态性检验结果均为 $P<0.05$,不符合正态分布,因此选择其中位数进行描述。非指数独立样本 Kruskal-Wallis 检验结果 $P<0.05$,即各光谱下的数据存在差异,因此可以对不同光谱吸引的四种典型昆虫数量进行相关性分析。四种典型昆虫相关数据的卡方检验显示 P 值<0.05,呈显著性相关。光谱峰值波长和四种典型昆虫数量均呈正相关关系。

不同光源光谱下的典型昆虫数量统计结果如表 4 所示,典型昆虫的光源光谱趋性概率 K 如图 11 所示。

表 4　不同光源光谱吸引的典型昆虫数量

Table 4　The typical number of insects attracted by different light source spectra

昆虫数量/只 Number of insects		不同光谱的光源 Light sources of different spectra							
		远红色光	深红色光	橘红色光	绿色光	青色光	蓝色光	蓝紫色光	紫外光
昆虫种类	双翅目	45	268	804	2505	2782	4644	2397	8881
Insect species	半翅目	19	45	613	1008	708	1143	654	2882
	鞘翅目	5	3	18	186	200	468	1294	2547
	鳞翅目	2	6	28	52	41	165	156	1868

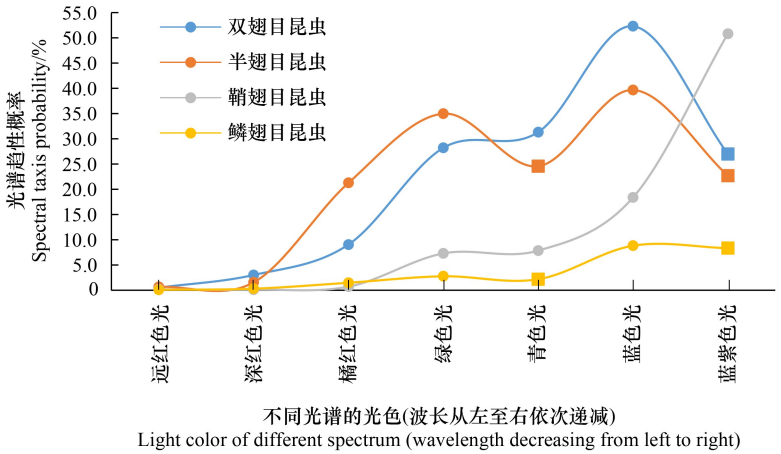

图 11 典型昆虫的光谱趋性概率统计图

Fig.11 Spectral taxis probability statistics of typical insects

三种实验场地下典型昆虫种类及数量如图 12 所示,从总体趋势上看,三种实验场地下的典型昆虫种类数量均为双翅目>半翅目>鞘翅目>鳞翅目。

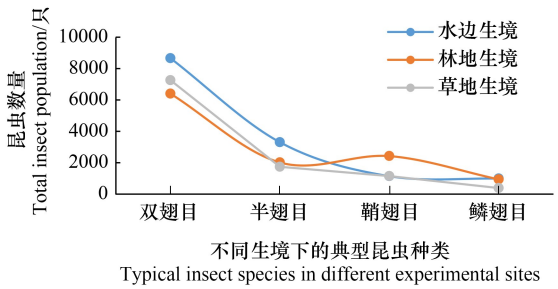

图 12 不同实验场地下的典型昆虫种类及数量统计图

Fig.12 Statistics of typical insect species and numbers in different experimental sites

2.2.1 同种昆虫的光源趋性差异

分别探究四种典型昆虫对不同光源的趋性概率,探究每种昆虫趋性较小光源,筛选趋性友好光谱。结合图 11 的分析可知:

(1)四类典型昆虫对光源的趋向性排序均为:红光波段<绿光波段<蓝光波段。实验中得到的昆虫光源倾向性数据基本和昆虫的三种视觉感受器感光范围一致[32]。

(2)双翅目、半翅目昆虫在红光波段中的 Far Red (660 nm)和 Deep Red(660 nm)光源下被吸引到的昆虫数量极少,其光谱趋性概率均小于 5.0%。从红光波段中的 Red Orange(627 nm)到绿光波段和蓝光波段,双翅目、半翅目的趋性概率明显上升,上升幅度分别为 43.2%和 18.4%。

(3)双翅目昆虫:对绿光波段中波长较短的 Cyan(500 nm)光源的趋性概率略大于 Green(519 nm)光源,趋性概率 K 分别为 28.2%和 31.3%;对蓝光波段中波长较短的 Royal Blue(447 nm)光源的趋性概率小于 Blue (478 nm)光源,且差异较大,趋性概率分别为 27.0%和 52.3%。

(4)半翅目昆虫:对绿光中波长较短的 Cyan(500 nm)光源的趋性概率小于 Green(519 nm)光源,趋性概率 K 分别为 24.6%和 35.0%;对蓝光波段中波长较短的 Royal Blue(447 nm)光源的趋性概率小于 Blue (478 nm)光源,且差异较大,趋性概率分别为 22.7%和 39.7%。

(5)鞘翅目昆虫:在红光波段下的趋性概率小于 2.0%、绿光波段下的趋性概率小于 8.0%。对蓝光波段中波长较短的 Royal Blue(447 nm)的趋性概率大于 Blue(478 nm)光源,且差异较大,趋性概率分别为 50.8%和 18.4%。

(6)鳞翅目昆虫:在红光波段下的趋向概率小于 2.0%、绿光波段下的趋性概率小于 3.0%。对蓝光波段中波长较短的 Royal Blue(447 nm)光源的趋性概率略小于 Blue(478 nm)光源。

2.2.2　同种光源的昆虫趋性分析

分别对 7 种光源所吸引昆虫的趋性概率进行分析,探究对各光源趋性概率较大的昆虫种类及典型昆虫对各光源的总体趋性概率,筛选对典型昆虫总体的趋性友好光谱。结合图 11 的分析可知:

(1)红光波段,包括 Far Red(740 nm)、Deep Red(660 nm)及 Red Orange(627 nm)。4 种典型昆虫对红光波段光谱的趋向性较小,均小于 3.0%。典型昆虫总体趋性概率为 11.4%。

(2)绿光波段,包括 Green(519 nm)、Cyan(500 nm)。Green(519 nm)趋性概率最大的是半翅目昆虫,Cyan(500 nm)趋性概率最大的是双翅目昆虫,趋性概率分别为 35.0%和 31.3%。四种典型昆虫的总体趋性概率为 45.7%。

(3)蓝光波段,包括 Blue(478 nm)、Royal Blue(447 nm)。Blue(478 nm)趋性概率最大的是双翅目昆虫,Royal Blue(447 nm)趋性概率最大的是鞘翅目昆虫,趋性概率分别为 52.3%和 50.8%。四种典型昆虫的总体趋性概率为 67.8%。

3　讨论

研究明确了城市绿地的典型趋光昆虫,证实了趋光昆虫的光谱趋性差异,揭示了光源的相对与绝对生态光谱,从而能够对城市生态照明提供理论与数据基础,以减少夜间人工光的生态危害。

(1)从总体上看,城市绿地趋光昆虫数量在总体上随着光源光谱峰值波长的减小而增长,长波长光谱的远红色光 Far Red (660 nm)与 深红色光 Deep Red(660 nm)可认为是绝对生态光源。

(2)在绿光波段的 Green 和 Cyan 光源中,Cyan(500 nm)光源吸引的昆虫数量一般更少。尤其是半翅目在 Cyan(500 nm)光谱范围内明显较少。因此,从生态保护的角度,绿色波段可以倾向选择 Cyan(500 nm)光源,以免对昆虫产生更多不利影响。

(3)在蓝光波段的 Blue 和 Royal Blue 光源中,Royal Blue(447 nm)光源吸引的昆虫数量一般更少(除了鞘翅目),这体现了昆虫的光源趋向性。因此,从生态保护的角度,蓝光波段可以倾向选择 Royal Blue(447 nm)光源,以免对昆虫产生更多不利影响。

本研究仅以正趋光的城市绿地昆虫作为研究对象,主要关注数量大、占比多的 4 种典型目昆虫,因此无法明确代表其他少数昆虫的光谱趋性。但根据已有研究,蚜虫[33]和草地螟[34]等昆虫的趋光敏感光谱集中于 440、400、420 nm 紫光及 562 nm 处绿色短波光。因此,有理由认为,短波光对多数趋光昆虫影响较大。本研究的人工光环境仅分析了不同光谱对城市绿地昆虫的吸引影响,在后续实验中可参考相关研究,从生境类型、昆虫行为和生理反应、以及其他光学指标,如光照强度、光照范围、光照时长等方面开展更广泛且深入的研究。

此外,根据相关资料[35]分析本次实验所捕获的昆虫:半翅目包括仰蝽科、划蝽科、臭虫科、蚜科、叶蝉科等害虫较多;鞘翅目包括步行虫科和萤科益虫、金龟子科和象鼻虫科害虫;鳞翅目包括夜蛾科、天蛾科、凤蝶科、粉蝶科等害虫、蛱蝶科益虫;双翅目包括蚊科、毛蚋科、丽蝇科、虻科等害虫和食蚜蝇科益虫。在本文所采用的昆虫诱捕方法下,所留存的样本及样本图像可清楚辨析昆虫细节,这将为昆虫鉴别的进一步细分提供支撑,如按“种”鉴别、明确害虫与益虫等,从而或可针对性的减少对有益昆虫的光污染危害,进而为今后的防控策略制定提供精准数据依据。

4　结论

从生态保护的角度出发,筛选昆虫“趋光友好”光谱,在野外实验条件下,探究城市绿地生境下趋光昆虫的种群数量的基础数据,建立趋光昆虫种群数量与光谱之间的量化关系。结果显示:7 种光源光谱吸引到最多的昆虫种类依次为双翅目、半翅目、鞘翅目和鳞翅目,数量占比分别为 61.1%、19.7%、11.1%、5.7%,占诱捕总量的 97.6%。城市绿地昆虫趋光性的整体趋势为随着光源峰值波长的增大趋光昆虫数量减少。对照紫外光(Ultraviolet,369 nm),典型昆虫对光源的趋性概率及占比分别为:远红色光(Far Red)0.5%、深红色光(Deep

Red)2.0%、橘红色光(Red Orange)9.0%、青色光(Cyan)22.8%、绿色光(Green)22.9%、蓝紫色光(Royal Blue)27.6%、蓝色光(Blue)40.1%,即典型昆虫对光源的趋性为红光波段<绿光波段<蓝光波段。不同昆虫目的光谱趋性存在差异:双翅目和鞘翅目昆虫对 Green(519 nm)和 Royal Blue(447 nm)光源的趋性较小,半翅目昆虫对 Cyan(500 nm)和 Royal Blue(447 nm)光源的趋性较小,鳞翅目昆虫对 Cyan(500 nm)光源的趋性较小。

绿地生境下的典型昆虫对人工光光谱的趋性不同,绿地生境下的人工光绝对生态光谱为红光,相对生态光谱为青色光(Cyan,500 nm)和蓝紫色光(Royal Blue,447 nm)。本研究筛选了对昆虫趋光性影响小的光谱,为降低夜间人工光对城市绿地典型昆虫的生态危害提供依据和思路。

参考文献(References):

[1] Bennie J, Duffy J P, Davies T W, Correa-Cano M E, Gaston K J. Global trends in exposure to light pollution in natural terrestrial ecosystems. Remote Sensing, 2015, 7(3): 2715-2730.

[2] Gaston K J, Visser M E, Hölker F. The biological impacts of artificial light at night: the research challenge. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2015, 370(1667): 20140133.

[3] Haynes K J, Robertson B A. A transdisciplinary research agenda for understanding insect responses to ecological light pollution informed by evolutionary trap theory. Current Opinion in Insect Science, 2021, 45: 91-96.

[4] Pérez Vega C, Zielinska-Dabkowska K M, Schroer S, Jechow A, Hölker F. A systematic review for establishing relevant environmental parameters forurban lighting: translating research into practice. Sustainability 2022, 14(19), 1107.

[5] Hölker F, Moss T, Griefahn B, Kloas W, Voigt C C, Henckel D, Hänel A, Kappeler P M, Völker S, Schwope A, Franke S, Uhrlandt D, Fischer J, Klenke R, Wolter C, Tockner K. The darkside of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. Ecology and Society, 2010, 15(4): 13.

[6] 冯娜, 范凡, 陶晡, 杨小凡, 魏国树. 光谱对东亚小花蝽趋光行为的影响. 生态学报, 2015, 35(14): 4810-4815.

[7] 查玉平, 张子一, 陈京元, 洪承昊, 程宇, 华祥, 易家喜. 华山松大小蠹对 LED 灯的趋光行为. 应用昆虫学报, 2019, 56(6): 1396-1401.

[8] 何旭栋, 李思钰, 季慧华, 陈华才. 一种多光谱诱虫实验装置的设计. 农业与技术, 2020, 40(23): 28-31.

[9] 张杰, 刘振兴, 雷朝亮, 朱芬. 波长、密度和光强对黏虫趋光行为的影响. 植物保护学报, 2021, 48(4): 855-861.

[10] 米娜. 两种蓟马趋光规律及不同波长色板田间诱捕效果评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.

[11] 罗一玮. 枸杞棉蚜趋光特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.

[12] 魏国树, 张青文, 周明牂, 吴卫国. 不同光波及光强度下棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)成虫的行为反应. 生物物理学报, 2000, 16(1): 89-95.

[13] 张锦芳, 张阳, 徐文平, 陶黎明. 昆虫的趋光性及其应用于害虫治理的研究进展. 世界农药, 2020, 42(11): 26-35.

[14] Brüning A, Hölker F, Franke S, Kleiner W, Kloas W. Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. Science of the Total Environment, 2016, 543: 214-222.

[15] Pawson S M, Bader M K F. LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. Ecological Applications, 2014, 24(7): 1561-1568.

[16] Rivas M L, Santidrián Tomillo P, Diéguez Uribeondo J, Marco A. Leatherback hatchling sea-finding in response to artificial lighting: interaction between wavelength and moonlight. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2015, 463: 143-149.

[17] Kyba C C M, Kuester T, Sánchez de Miguel A, Baugh K, Jechow A, Hölker F, Bennie J, Elvidge C D, Gaston K J, Guanter L. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. Science Advances, 2017, 3(11): e1701528.

[18] Massetti L. Drivers of artificial light at night variability in urban, rural and remote areas. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 255: 107250.

[19] Owens A C S, Lewis S M. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: a review and synthesis. Ecology and Evolution, 2018, 8(22): 11337-11358.

[20] 欧云海.摸清基础情况高效全面保护昆虫多样性,科技日报.2023.03.03.http://tech.ce.cn/news/202303/03/t20230303_38422491.shtml.

[21] Larsson M, Anders G, Milberg P.Night, light and flight: light attraction in Trichoptera.Insect Conservation and Diversity, 2020, 13(3): 296-302.

[22] Nowinszky L, Kiss O, Puskás J. Swarming patterns of light trapped individuals of caddisfly species (*Trichoptera*) in Central Europe. Central European Journal of Biology, 2014, 9(4): 417-430.

[23] Rich C, Longcore T. Ecological consequences of artificial night lighting. Washington, DC: Island Press, 2006.

[24] Venter G J, Majatladi D M, Labuschagne K, Boikanyo S N B, Morey L. The attraction range of the Onderstepoort 220 V light trap for *Culicoides*

biting midges as determined under South African field conditions. Veterinary Parasitology, 2012, 190(1/2): 222-229.

[25] Kim K N, Huang Q Y, Lei C L. Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. Pest Management Science, 2019, 75(12): 3135-3143.

[26] Goretti E, Coletti A, Di Veroli A, Di Giulio A M, Gaino E. Artificial light device for attracting pestiferous chironomids (Diptera): a case study at Lake Trasimeno (Central Italy). Italian Journal of Zoology, 2011, 78(3): 336-342.

[27] Pawson S M, Watt M S, Brockerhoff E G. Using differential responses to light spectra as a monitoring and control tool for *Arhopalus ferus* (Coleoptera: Cerambycidae) and other exotic wood-boring pests. Journal of Economic Entomology, 2009, 102(1): 79-85.

[28] Wallner W E, Humble L M, Levin R E, Baranchikov Y N, Carde R T. Response of adult lymantriid moths to illumination devices in the Russian far east. Journal of EconomicEntomology, 1995, 88(2): 337-342.

[29] Mikkola K. Behavioural and electrophysiological responses of night-flying insects, especially Lepidoptera, to near-ultraviolet and visible light. Annales Zoologici Fennici, 1972, 9(4): 225-254.

[30] van Grunsven R H A, Donners M, Boekee K, Tichelaar I, van Geffen K G, Groenendijk D, Berendse F, Veenendaal E M. Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. Journal of Insect Conservation, 2014, 18(2): 225-231.

[31] Wakefield A, Broyles M, Stone E L, Jones G, Harris S. Experimentally comparing the attractiveness of domestic lights to insects: Do LEDs attract fewer insects than conventional light types? Ecology and Evolution, 2016, 6(22): 8028-8036.

[32] Briscoe A D, Chittka L. The evolution of color vision in insects. Annual Review of Entomology, 2001, 46: 471-510.

[33] Sanders D, Baker D J, Cruse D, Bell F, van Veen F J F, Gaston K J. Spectrum of artificial light at night drives impact of a diurnal species in insect food web. Science of the Total Environment, 2022, 831: 154893.

[34] 江幸福, 张总泽, 罗礼智. 草地螟成虫对不同光波和光强的趋光性. 植物保护, 2010, 36(6): 69-73.

[35] 唐艳红, 毕思言, 王晓迪, 马东方, 杨念婉, 郭建洋, 吕志创, 刘万学. 昆虫视觉系统和视觉蛋白现状及展望. 中国生物防治学报, 2023, 39(3): 718-730.