

丽水九龙国家湿地公园三叶虫萤生境特征对其种群密度的影响

王泽胜¹, 李 胜¹, 陶一舟¹, 朱志欣², 汪 婧¹, 王华珍³

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 丽水学院 中国青瓷学院, 浙江 丽水 323000;

3. 丽水蓝城农科检测技术有限公司, 浙江 丽水 323000)

摘要: 【目的】研究分析九龙国家湿地公园三叶虫萤 *Emeia pseudosauteri* 生境特征以及相关生境因子对其种群密度的影响, 了解三叶虫萤的生境需求, 为开展物种资源保护利用、种群繁育、栖息地保护管理等研究提供科学参考。

【方法】2022年4月上旬, 以九龙国家湿地公园及其周边三叶虫萤栖息地为研究区, 设置34个调查点, 实地调研获取每个调查点的三叶虫萤种群密度和12个生境因子数据, 建立多元逐步回归模型分析不同生境因子对种群密度的影响。

【结果】郁闭度 [X_{CC} , 标准化系数 (β) = 0.505, $P < 0.001$] 和土壤含水量 (X_{SWC} , $\beta = 0.143$, $P = 0.029$) 对三叶虫萤种群密度 (D) 呈显著正相关, 风速 (X_{WS} , $\beta = -0.424$, $P < 0.001$) 对种群密度呈显著负相关。逐步回归方程为 $D = 7.446X_{CC} - 1.666X_{WS} + 9.337X_{SWC} - 6.584$ 。调整后的 R^2 为 0.930, 德宾-沃森检验 (Durbin-Watson) 结果为 1.615, 方差膨胀系数 < 5 , $P < 0.05$, 说明纳入分析模型的3个生境因子之间相互独立, 不存在共线性, 该结果具有统计学意义。【结论】较高的郁闭度、较低的风速和较高的土壤含水量是三叶虫萤根据自身生物特性和生活习性对环境作出的选择, 反映了三叶虫萤在沟通交流、求偶交配、繁殖产卵等方面的生境需求。在开展三叶虫萤种群繁育保护和栖息地管理中应注意增加郁闭度、降低环境风影响、维持适宜的土壤湿度和空气湿度。表4参32

关键词: 三叶虫萤; 种群密度; 生境因子; 多元逐步回归分析; 九龙国家湿地公园

中图分类号: Q969.48+6.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)04-0859-08

Effects of habitat characteristics on population density of *Emeia pseudosauteri* in Kowloon National Wetland Park, Lishui

WANG Zesheng¹, LI Sheng¹, TAO Yizhou¹, ZHU Zhixin², WANG Jing¹, WANG Huazhen³

(1. College of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. China

Celadon College, Lishui University, Lishui 323000, Zhejiang, China; 3. Lishui Lancheng Agricultural Science Testing

Technology Co., Ltd., Lishui 323000, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] The objective is to study and analyze the habitat characteristics of *Emeia pseudosauteri* in Kowloon National Wetland Park and the influence of relevant habitat factors on its population density (D), so as to understand the habitat requirements of *E. pseudosauteri* and provide scientific reference for future research on species resources conservation and utilization, population breeding, habitat protection and management.

[Method] In early April 2022, taking Kowloon National Wetland Park and the surrounding habitat of *E. pseudosauteri* in Lishui of Zhejiang Province as the research area, 34 survey points were set up to obtain the population density of *E. pseudosauteri* and 12 habitat factors data at each survey point, and a multiple stepwise

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2023-01-08

基金项目: 国家林业和草原局软科学项目 (2020131027); 浙江省教育厅一般科研项目 (Y202044840); 浙江省公益基金资助项目 (LGN19E080002)

作者简介: 王泽胜 (ORCID: 0000-0002-6763-7415), 从事风景园林生态与技术研究。E-mail: wzs598493430@163.com。通信作者: 李胜 (ORCID: 0000-0002-9124-7265), 副教授, 从事园林生态与风景园林技术研究。E-mail: 8357573@qq.com

regression model was established to analyze the impact of different habitat factors on population density. [Result] Canopy closure [X_{CC} , standardized coefficient (β)=0.505, $P<0.001$] and soil water content (X_{SWC} , β =0.143, $P=0.029$) had a significant positive correlation with the population density of *E. pseudosauteri*. Wind speed (X_{WS} , β =-0.424, $P<0.001$) had a significant negative correlation with population density. Stepwise regression equation: $D=7.446X_{CC}-1.666X_{WS}+9.337X_{SWC}-6.584$. The adjusted R^2 was 0.930, the Durbin-Watson test result was 1.615, the variance inflation coefficient was less than 5, and the significance P values were less than 0.05, indicating that the three habitat factors included in the analysis model were independent of each other, and there was no collinearity. The analysis result was statistically significant. [Conclusion] Higher canopy density, lower wind speed and higher soil water content are choices of environment made by *E. pseudosauteri* according to its own biological characteristics and living habits, reflecting its habitat needs in communication, mating, breeding and spawning. Therefore, in carrying out the breeding, protection and habitat management of *E. pseudosauteri* population, attention should be paid to increasing canopy closure, reducing the impact of environmental wind, and maintaining suitable soil and air humidity. [Ch, 4 tab. 32 ref.]

Key words: *Emeia pseudosauteri*; population density; habitat factors; multiple stepwise regression analysis; Kowloon National Wetland Park

萤火虫(鞘翅目 Coleoptera: 萤科 Lampyridae)具有生物发光的特性,一直受到人们的喜爱和追捧^[1-2]。但近几十年来,城市扩张、工业污染和土地利用的改变导致萤火虫自然生境破碎丧失,中国绝大多数地方的萤火虫种群数量已经明显减少^[3-4]。从生物保护实践的角度来看,拯救受威胁物种的最佳方法就是保护其生境^[5]。大多数品种的萤火虫在整个生命周期中需要利用河流、驳岸、灌木丛等多样生境空间,对小尺度、低程度的生境变化更加敏感^[6-7]。因此,为了有效地保护萤火虫种群,避免人类活动的不利干扰,准确了解萤火虫的生境需求和栖息地特征是必不可少的。如日本从1996年开始对其特有的源氏萤 *Luciola cruciata* 和平家萤 *Aquatica lateralis* 的生境特征进行了长期的研究,从多角度分析了这2种萤火虫的生态习性和生境特征,为后来日本萤火虫种群繁育保护和栖息地构建提供了科学指导,一定程度上促进了当地萤火虫产业的繁荣发展^[8-10]。除此之外,东南亚和美洲的许多国家也都积累了丰富的研究成果,逐渐成为全球主要的赏萤生态旅游目的地^[11]。

据统计,中国已经确定的萤科昆虫有5亚科24属141种1亚种,凹眼萤科 Rhagophthalmidae 昆虫1属20种^[7,12]。随着自然保护意识的增强和生态旅游的兴起,某些品种的萤火虫逐渐被大家所熟知。这其中就包括峨眉萤属 *Emeia* 的三叶虫萤 *Emeia pseudosauteri*^[13]。三叶虫萤主要分布于四川、湖北和浙江。浙江省丽水市九龙国家湿地公园经过多年的生态建设,为三叶虫萤创造了适宜的生存环境,使得该种群通过自然累积在2014年前后大规模爆发,并且在随后的几年之中迅速扩大。根据九龙国家湿地公园管理处的统计,高峰期三叶虫萤种群数量可达4000多万只,在湿地公园内80%的地方均有出现。三叶虫萤的虫卵、幼虫和成虫都需要稳定高质量的栖息地环境,对环境变化和人类活动干扰有着强烈的敏感性^[13],可以作为非常优秀的环境指示物种。除此之外,三叶虫萤所需要的生境条件能够涵盖其他类似物种的生境需求,并在典型环境中填补掠食者生态位,可以作为伞护种维持生态系统的平衡和稳定^[14-15]。更重要的是,三叶虫萤羽化成虫时间在每年的3—4月,相较于其他品种萤火虫更早,延长了国内以往只在6—8月的赏萤时间,而且种群密度高,极易形成大面积的萤火虫闪光美景^[13]。这些优点使得三叶虫萤在短短几年之内就成为丽水生态旅游、文化宣传、自然教育、环境保护等活动的理想主角,唤起公众对于生态环境的保护意识^[16-18]。因此,作为极具价值的昆虫资源,三叶虫萤的保护利用研究需要得到充分重视。目前三叶虫萤相关研究集中在生物形态、生殖生理、虫卵孵化、幼虫发育等方面^[13,19-20],缺少关于生境需求和栖息地环境因子等方面的研究。鉴于此,本研究选取了多个环境因子数据,分析九龙国家湿地公园内三叶虫萤现有分布区的生境特征,了解三叶虫萤生境需求,研究生境因子对三叶虫萤种群密度的影响,以期三叶虫萤物种资源的保护利用、种群繁育、栖息地保护管理等提供

科学参考。

1 研究区概况

九龙国家湿地公园位于浙江省丽水市城区西南部 ($28^{\circ}22'28.0''\sim 28^{\circ}22'39.7''\text{N}$, $119^{\circ}49'24.8''\sim 119^{\circ}49'31.2''\text{E}$), 以河流、滩涂和森林沼泽为主, 还包括了两岸的防护林带以及少量沿江的自然山体, 整体属于河流型湿地生态系统, 环境优越^[21]。湿地公园所在的大溪横贯丽水中部河谷平原, 是八百里瓯江中最具原生态风貌的江段, 也是许多鱼类、鸟类和昆虫的重要栖息地^[22]。九龙国家湿地公园总面积约 16.86 km^2 , 其中水域面积为 5.96 km^2 , 占总面积约 35.35% 。

2 研究方法

2.1 调查点设置

从 2015 年开始, 持续调查记录三叶虫萤栖息地范围的变化情况。截至 2022 年 4 月, 三叶虫萤的分布区域可以分为一大一小 2 个区块, 分别为九龙国家湿地公园区块和 2022 年新增加的白岩绿道区块, 整体呈现出以九龙国家湿地公园为中心沿着大溪流域向上下游扩散的趋势。根据三叶虫萤栖息地分布情况, 结合植被、地形等特征, 以间隔最少 200 m 为限制条件, 在研究区内设置了 34 个调查点。

2.2 三叶虫萤种群密度调研

三叶虫萤飞行移动性较低且发光时长和闪烁间隔明显, 因此采用目视观察法和闪光计数法记录单位面积内三叶虫萤成虫数量, 以此来计算调查点的三叶虫萤种群密度^[9, 13]。由往年数据统计可知: 三叶虫萤成虫数量一般在每年的 4 月初达到峰值, 在日落 1 h 后出现发光的鼎盛期。由于调查点数量较多, 因此将三叶虫萤种群密度调研设定在 2022 年 4 月 1—10 日 20:00—21:00 分多次进行。根据三叶虫萤活动情况, 在每个调查点中挑选目测发光点较为集中的区域随机设置 2~3 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的正方形样方, 每个样方由 2~3 名观测员同时观测记录三叶虫萤的数量, 观测时间持续 1 min , 以所有观测员所计数值的平均数作为该样方的种群数量^[8]。为了避免重复计数和减少误差, 规定观察到同一点连续发光闪烁 2 次以上记为 1 只。同样为了避免观测员目视疲劳所导致的计数误差, 会进行人员轮换, 以此来提升观察数据的客观性和可靠性。最后以所有样方的平均数作为该调查点的三叶虫萤种群密度。

2.3 生境因子调研

在充分考虑三叶虫萤习性和研究区域内生态环境特征的前提下, 本研究选择了气候因子(气温、相对湿度、风速), 光照因子(环境光), 植被因子(郁闭度、乔木平均高度、植被密度、灌木地被平均高度、地被覆盖度、凋落物层厚度), 土壤因子(土壤 pH 值、土壤含水量)作为影响三叶虫萤种群密度的生境因子。为了确保生境因子的时效性, 每个调查点关于气温、相对湿度、风速、环境光强的测量以及土壤取样工作与该点种群密度调研在同一时段进行。植被因子的调查于 2022 年 4 月上旬完成。在每个调查点中选择三叶虫萤较为集中的区域, 设置 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的正方形生境因子调查样方。具体调查测量方法如下。

气温和相对湿度: 利用德力西 THM-01 便携式温湿度计测量, 重复 3 次, 取平均值。风速: 利用标智 GM8902 手持式风速仪测量, 重复 3 次, 取平均值。环境光强: 使用分辨率为 0.01 lx 的泰仕 TES-1330A 数字照度计, 依次测量样方左右前后上共 5 个方向的环境光强, 取平均值。郁闭度: 采用树冠投影法测量^[23]。乔木平均高度: 测量记录样方内所有乔木的高度, 取平均值。植被密度: 在 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的样方内随机设置 1 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的小样方, 测量计算小样方内地被和小灌木数量获得。灌木地被平均高度: 测量样方对角线上所有灌木和地被层植株的高度, 取平均值。地被覆盖度: 在 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的样方内随机设置 1 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的小样方, 并在方格纸中绘制出小样方内地被和小灌木所占范围, 估算其占小样方比例, 作为该调查点地被覆盖度。凋落物层厚度: 在样方中随机选取 5 个点, 测量凋落物层厚度, 取平均值。土壤 pH: 在 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的样方内采用梅花形 5 点取样法进行采土, 每个点取土深度为 20 cm , 采土 $200\sim 250\text{ g}$, 将同一个样方中 5 个点的土壤均匀混合, 得到 $1\ 000\sim 1\ 250\text{ g}$ 土壤样本并标号, 将土壤样本带回实验室检测土壤 pH。土壤含水量: 利用采集到的土壤样本检测土壤含水量。

2.4 数据处理与分析

利用 Shapiro-Wilk 检验确定种群密度和生境因子数据是否符合正态分布，对于非正态分布的变量数据进行对数转换^[24]。为了排除数据量纲不同而造成的偏差，将所有比例数据进行反正弦转换^[25]。利用 Pearson 相关性分析法，剔除高相关性变量，排除变量之间多重共线性对分析结果的影响，再将筛选出的生境因子作为自变量，种群密度作为因变量纳入多元逐步回归分析中。为了确保逐步回归模型中只包含显著相关的关键因子，所有生境因子都要根据 F 检验来决定输入或者剔除^[26]。由此筛选出影响三叶虫萤种群密度的关键生境因子，并建立包含关键因子的逐步回归方程。以上分析均在 SPSS 26.0 中进行。

3 结果与分析

3.1 生境因子与种群密度调研结果

各调查点三叶虫萤种群密度和生境因子如表 1 所示。

表 1 34 个调查点的三叶虫萤种群密度和生境因子调研结果

Table 1 Results of *E. pseudosauteri* population density and habitat factors in 34 survey sites

点位编号	$D/(\text{只}\cdot\text{m}^{-2})$	$X_{\text{TEMP}}/^{\circ}\text{C}$	$X_{\text{RH}}/\%$	$X_{\text{WS}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	X_{AL}/lx	$X_{\text{CC}}/\%$	X_{ATH}/m	$X_{\text{PD}}/(\text{株}\cdot\text{m}^{-2})$	$X_{\text{AHSG}}/\text{cm}$	$X_{\text{GC}}/\%$	X_{TBL}/cm	pH	$X_{\text{SWC}}/\%$
1	4.3	12.4	63.80	1.4	0.07	63	15.8	78	16.7	63.50	6.3	6.24	33.32
2	8.2	11.3	77.30	0.7	0.05	86	12.5	105	18.5	72.40	11.5	5.85	47.16
3	2.1	11.6	59.27	1.8	0.17	57	16.5	69	16.3	60.50	4.3	5.92	33.47
3	0.2	13.3	52.48	2.7	0.25	37	4.5	38	82.5	52.40	3.4	6.84	34.64
5	0.7	10.8	54.23	2.3	0.20	42	8.6	66	68.4	66.20	2.8	6.58	32.53
6	0.2	10.3	56.04	3.0	0.22	24	3.8	53	22.5	43.60	1.9	6.13	38.61
7	4.8	9.7	67.16	1.5	0.11	68	9.5	82	32.6	84.60	6.6	6.74	42.12
8	6.4	10.4	66.70	1.5	0.09	86	14.0	99	32.3	87.30	6.5	6.38	42.64
9	0.8	10.9	64.30	2.2	0.16	53	9.8	59	58.7	58.32	4.5	6.11	37.68
10	0.3	11.7	58.64	2.1	0.19	32	6.8	47	72.4	47.93	1.8	5.83	41.28
11	1.8	11.3	57.12	2.2	0.13	61	5.3	63	62.4	78.30	6.2	6.38	35.26
12	5.2	9.8	74.24	1.3	0.06	75	9.5	86	44.6	83.70	5.7	6.44	43.62
13	1.3	12.4	68.59	1.9	0.14	44	10.5	64	67.3	90.20	4.7	6.81	37.66
14	4.4	11.8	70.43	1.9	0.08	72	17.5	87	37.4	96.50	3.7	5.66	36.46
15	7.1	10.8	69.20	1.2	0.06	77	15.4	95	68.3	95.40	10.3	6.59	43.87
16	10.2	11.2	76.53	0.6	0.03	94	17.3	108	46.5	92.30	9.6	6.56	45.26
17	9.4	11.6	75.32	0.3	0.02	90	5.5	103	37.5	79.20	8.4	6.37	40.68
18	0.4	10.3	55.71	2.5	0.15	47	15.0	56	77.5	94.40	3.3	6.28	32.52
19	0.6	12.3	62.21	1.8	0.17	35	4.5	62	17.5	83.50	4.4	5.71	31.38
20	4.6	10.5	71.43	0.9	0.04	73	9.8	77	33.5	93.80	8.2	6.25	36.59
21	3.8	10.7	67.23	2.2	0.09	71	11.5	70	33.5	72.60	5.2	6.55	38.21
22	4.5	11.5	64.54	1.6	0.06	82	12.3	84	47.3	82.40	5.5	6.62	41.64
23	6.2	9.6	71.58	1.2	0.05	79	9.7	95	47.4	81.64	7.8	5.97	40.83
24	1.4	10.3	66.53	2.6	0.12	68	8.6	67	22.8	78.79	5.3	6.45	35.77
25	2.7	9.4	65.28	1.4	0.10	53	5.7	72	73.6	72.51	5.2	6.33	43.62
26	3.2	11.5	70.52	1.7	0.09	56	7.5	77	55.5	57.38	3.8	6.57	44.69
27	0.2	12.7	63.88	2.6	0.28	44	8.5	35	87.2	44.52	2.3	5.93	32.17
28	7.6	11.4	67.28	0.5	0.07	74	12.5	92	45.7	88.62	6.5	6.43	44.86
29	6.5	10.8	70.35	0.9	0.10	73	11.6	94	44.9	74.68	9.4	6.58	39.82
30	8.4	9.7	73.22	0.4	0.08	83	14.2	104	34.8	85.46	11.2	5.74	43.74
31	3.6	10.6	71.83	2.5	0.12	64	7.8	76	52.7	76.51	6.8	5.69	36.53
32	7.3	11.5	73.24	0.7	0.04	92	9.3	99	33.2	92.66	7.9	5.82	42.65
33	6.8	10.3	75.62	0.5	0.03	66	10.8	97	27.5	85.92	8.5	6.33	43.72
34	5.7	9.8	72.57	0.8	0.09	70	9.2	83	31.7	86.52	4.8	6.41	39.64

说明： D . 三叶虫萤种群密度； X_{AL} . 环境光强； X_{PD} . 植被密度； X_{TEMP} . 气温； X_{RH} . 相对湿度； X_{WS} . 风速； X_{CC} . 郁闭度； X_{ATH} . 乔木平均高度； X_{AHSG} . 灌木地被平均高度； X_{GC} . 地被覆盖度； X_{TBL} . 凋落物层厚度；pH. 土壤 pH； X_{SWC} . 土壤含水量。

3.2 各生境因子之间的相关性分析

如果相关系数 $|r| \geq 0.8$ ，则认为 2 个变量之间存在高度相关性，需要剔除^[27]。从表 2 可见：环境光强和植被密度与其他生境因子普遍存在高度相关性，因此剔除这 2 个因子。最终筛选出气温、相对湿度、风速、郁闭度、乔木平均高度、灌木地被平均高度、地被覆盖度、枯枝落叶层厚度、土壤 pH、土壤含水量等 10 个生境因子变量用于回归分析。

表 2 三叶虫萤栖息地 12 个生境因子相关性分析结果

Table 2 Results of correlation analysis of 12 habitat factors in *E. pseudosauteri* habitat

生境因子	X_{TEMP}	X_{RH}	X_{WS}	X_{AL}	X_{CC}	X_{ATH}	X_{PD}	X_{AHSG}	X_{GC}	X_{TBL}	pH	X_{SWC}
X_{TEMP}	1											
X_{RH}	-0.295	1										
X_{WS}	0.235	-0.756	1									
X_{AL}	0.247	-0.801	0.826	1								
X_{CC}	-0.264	0.764	-0.742	-0.834	1							
X_{ATH}	-0.040	0.289	-0.329	-0.313	0.489	1						
X_{PD}	-0.381	0.801	-0.852	-0.851	0.884	0.477	1					
X_{AHSG}	0.193	-0.379	0.367	0.389	-0.363	-0.214	-0.483	1				
X_{GC}	-0.291	0.492	-0.512	-0.581	0.594	0.476	0.611	-0.174	1			
X_{TBL}	-0.287	0.727	-0.776	-0.739	0.788	0.367	0.833	-0.344	0.508	1		
X_{SPH}	-0.021	-0.119	0.004	-0.048	0.017	-0.050	-0.021	0.264	0.069	-0.018	1	
X_{SWC}	-0.394	0.654	-0.656	-0.611	0.588	0.153	0.696	-0.132	0.255	0.577	0.141	1

说明： D ：三叶虫萤种群密度； X_{AL} ：环境光强； X_{PD} ：植被密度； X_{TEMP} ：气温； X_{RH} ：相对湿度； X_{WS} ：风速； X_{CC} ：郁闭度； X_{ATH} ：乔木平均高度； X_{AHSG} ：灌木地被平均高度； X_{GC} ：地被覆盖度； X_{TBL} ：凋落物层厚度；pH：土壤 pH； X_{SWC} ：土壤含水量。

3.3 多元逐步回归分析

由表 3 可知：多元逐步回归分析模型的相关系数 (R)、决定系数 (R^2)、调整后的决定系数 (R^2_{adj}) 均大于 0.8，说明模型拟合度高，所建立的回归方程可以很好地反映种群密度与生境因子之间的关系。在显著水平下 ($P < 0.05$) 模型最终包含了郁闭度、风速和土壤含水量这 3 个生境因子变量， R^2_{adj} 为 0.930，说明这 3 个生境因子是影响三叶虫萤种群密度的关键因子。Durbin-Watson 检验统计量为 1.615，接近于 2，证明被选择的 3 个生境因子变量之间相互独立，没有自相关性^[28]。

由表 4 可知：在回归分析中，被纳入的 3 个生境因子变量方差膨胀系数为 1.830~2.665，均小于 5，说明变量之间不存在多重共线性，符合多元回归分析的要求。3 个生境因子变量 t 检验对应的 P 均小于 0.05，说明郁闭度 ($P < 0.001$)、风速 ($P < 0.001$) 和土壤含水量 ($P = 0.029$) 对种群密度存在显著影响。标准化系数 (β) 可以反映自变量对因变量影响的重要程度，其绝对值越大则对因变量的影响越大，而其正负性可以表示自变量与因变量之间是正相关或负相关。因此，对三叶虫萤种群密度影响最大的是郁闭度 ($\beta = 0.505$)，其次是风速 ($\beta = -0.424$) 和土壤含水量 ($\beta = 0.143$)。其中郁闭度和土壤含水量与种群密度呈正相关，说明郁闭度和土壤含水量较高的地方更适合三叶虫萤生存栖息。风速与种群密度呈负相关，风速越大，种群密度越小。最终可以建立郁闭度 (X_{CC})、风速 (X_{WS})、土壤含水量 (X_{SWC}) 对三叶虫萤种群密度 (D) 的逐步回归方程： $D = 7.446X_{CC} - 1.666X_{WS} + 9.337X_{SWC} - 6.584$ 。

4 讨论

适宜的生境能够为三叶虫萤提供生存资源、空间庇护和繁衍条件。一些生境因子对三叶虫萤种群密

表 3 三叶虫萤种群密度与生境因子的逐步回归分析结果

Table 3 Results of stepwise regression analysis of *E. pseudosauteri* population density and habitat factors

生境因子	R	R^2	R^2_{adj}	E_{SE}	d
郁闭度	0.903	0.816	0.810	1.304	3
风速	0.962	0.925	0.921	0.843	1
土壤含水量	0.968	0.937	0.930	0.790	3
				1.615	

说明： R 为相关系数； R^2 为决定系数； R^2_{adj} 为调整后的决定系数； d 为 Durbin-Watson 检验统计量； E_{SE} 为估计标准误差。

表4 三叶虫萤种群密度与生境因子的逐步回归模型系数

Table 4 Stepwise regression model coefficients of *E. pseudosauteri* population density and habitat factors

被选择的变量	未标准化系数(B)	标准误差	标准化系数(β)	<i>t</i>	<i>P</i>	共线性统计	
						容差	方差膨胀系数
常数项	-6.584	3.038		-2.168	0.038		
郁闭度	7.446	1.033	0.505	7.209	0.000	0.431	2.318
风速	-1.666	0.295	-0.424	-5.650	0.000	0.375	2.665
土壤含水量	9.337	4.062	0.143	2.299	0.029	0.546	1.830

度的影响本质上就是三叶虫萤根据自身的生物特性和生活习性对自然环境所做出的一种选择。结合三叶虫萤的生物特征和生活习性能够尝试解释这些因子发挥作用的原因。

萤火虫会在夜晚发出特殊的生物闪光,这些闪光信号拥有通信交流、吸引求偶、警示天敌、引诱捕食等功能,并且可能存在完善的闪光通信系统^[29]。萤火虫为提升闪光通信功能的利用效果,需要较为黑暗的空间,即使月光也会阻碍其活动。研究证明:郁闭度能够影响栖息地的光环境,从而对萤火虫成虫种群密度产生影响^[30]。在本研究中,生境因子郁闭度($\beta=0.505$, $P<0.001$)是影响三叶虫萤种群密度的主要原因,较高的郁闭度可以遮蔽月光和人造光,为三叶虫萤创造适宜的夜晚活动空间。在未来的栖息地保护管理中需要重点关注九龙国家湿地公园及其周边区域的植被茂密和覆盖情况,避免由于水流冲击、人为破坏、农田耕作等因素,导致植被减少,郁闭度下降。

一定程度的风速会对飞行昆虫的活动产生影响^[31]。逐步回归分析结果表明:三叶虫萤种群密度会随着风速($\beta=-0.424$, $P<0.001$)增大而降低,整体呈现负相关。作为小型飞行昆虫的三叶虫萤会因为较大的风速而无法进行正常的飞行活动。在实地调研中发现:三叶虫萤雄萤飞行能力远胜于雌萤。雄萤经常活动在灌木地被植物顶端,飞行高度集中在0.5~1.6 m。雄萤依靠飞行能力可以根据闪光信号轻松找到隐藏在草丛里的雌萤并完成交配。因此低风速甚至无风的区域是三叶虫萤成虫寻找配偶完成交配的最佳场所,会有大量的成虫聚集,种群密度也会相对较高。

三叶虫萤虽然是陆生萤火虫,但表现出较高的亲水性,主要的栖息地都沿着河流分布。这可能是由于三叶虫萤喜好将虫卵产在石下阴暗处和潮湿的苔藓上。有研究证明:当三叶虫萤的虫卵处于湿度为40%的孵化介质中时,最容易成功孵化^[32]。由此可以推测:河流水域周围土壤含水量较高,苔藓、腐殖质、凋落物等适合产卵的介质湿度也相对较高,符合虫卵孵化条件。本研究土壤含水量($\beta=0.143$, $P=0.029$)对三叶虫萤种群密度正相关的结果也在一定程度上支持了这一观点。土壤含水量较高的区域能够吸引更多的成虫前来聚集产卵。

在三叶虫萤生境保护管理中应特别注意郁闭度的变化,可以通过增加植被密度来提高郁闭度,为三叶虫萤夜晚活动创造更好的条件。在每年3—5月需重点观察三叶虫萤栖息空间的风速、风向变化,并在合适的区域补植一些植被,降低风速的影响。此外,应该在三叶虫萤产卵和虫卵孵化的特殊时期,密切监测土壤和空气湿度的变化,在必要的时候也可以人为增加湿度,维持合适的环境条件。

5 参考文献

- [1] 朱志欣,李胜.萤火虫景观调查与构建[J].中国园林,2015,31(8):25-28.
ZHU Zhixin, LI Sheng. The survey and construction of firefly landscape [J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(8): 25-28.
- [2] 王郡明,梁醒财,罗佑珍.萤火虫生物学特性及其应用研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2006,21(5):576-580.
WANG Junming, LIANG Xingcai, LUO Youzhen. Surveys of bionomics and application of firefly [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2006, 21(5): 576-580.
- [3] PRASERTKUL T. Characteristics of *Pteroptyx* firefly congregations in a human dominated habitat [J]. Journal of Insect Behavior, 2018, 31(4): 436-457.
- [4] 时秀明,李燕,朱志欣,等.乐清市仙溪水乡萤火虫栖息地营建探析[J].风景园林,2017,24(5):101-106.
SHI Xiuming, LI Yan, ZHU Zhixin, et al. Study on the construction of firefly habitat in Xianxi Town in Yueqing City [J].

- Landscape Architecture*, 2017, **24**(5): 101 – 106.
- [5] MEFFE G K, CARROLL C R, GROOM M J. *Principles of Conservation Biology* [M]. 3rd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2006.
- [6] HWANG Y T, MOON J, LEE W S, *et al.* Evaluation of firefly as a tourist attraction and resource using contingent valuation method based on a new environmental paradigm [J]. *Journal of Quality Assurance in Hospitality & Tourism*, 2020, **21**(3): 320 – 336.
- [7] 曹成全, 张毅, 王义哲, 等. 萤火虫的研究、保护及开发利用进展[J/OL]. 环境昆虫学报, 2022-03-09[2022-08-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20220308.1543.002.html>.
CAO Chengquan, ZHANG Yi, WANG Yizhe, *et al.* Progress in the research, conservation and exploitation of fireflies [J/OL]. *Journal of Environmental Entomology*. 2022-03-09[2022-08-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20220308.1543.002.html>.
- [8] SHIBUE K, OHBA N, FUJII E. Analysis of habitat factor which influence on population of *Luciola cruciata* at Nobi district in the Miura peninsula [J]. *Journal of The Japanese Institute of Landscape Architecture*, 1995, **58**(5): 121 – 124.
- [9] SHIBUE K, OHBA N, FUJII E. Habitat analysis of *Luciola lateralis* especially around Yatoda, terraced paddy field in the narrow valley [J]. *Journal of Japan Society on Water Environment*, 1996, **19**(4): 323 – 330.
- [10] OSAWA S, KATSUNO T, SERA K. Habitats of *Luciola lateralis* and *Pyrocoelia fumosa* in valley bottom in urban greenery [J]. *Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology*, 2005, **31**(1): 187 – 189.
- [11] LEWIS S M, THANCHAROEN A, WONG C H, *et al.* Firefly tourism: advancing a global phenomenon toward a brighter future [J/OL]. *Conservation Science and Practice*, 2021, **3**(5): e391[2022-08-26]. doi: 10.1111/csp2.391.
- [12] 曹倍荣, 闫振天, 陈斌. 中国萤科和雌光萤科昆虫名录[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2021, **38**(5): 21 – 36.
CAO Beirong, YAN Zhentian, CHEN Bin. Checklist of Lampyridae and Rhagophthalmidae insect of China [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2021, **38**(5): 21 – 36.
- [13] FU Xinhua, BALLANTYNE L A, LAMBKIN C. *Emeia* gen. nov., a new genus of Luciolinae fireflies from China (Coleoptera: Lampyridae) with an unusual trilobite-like larva, and a redescription of the genus *Curtos* Motschulsky [J]. *Zootaxa*, 2012, **3403**(1): 1 – 53.
- [14] MADRUGA R O, HERNÁNDEZ Q M. Larval feeding habits of the Cuban endemic firefly *Alecton discoidalis* Laporte (Coleoptera: Lampyridae) [J/OL]. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2010: 149879[2022-08-26]. doi: 10.1155/2010/149879.
- [15] ROBERGE J M, ANGELSTAM P. Usefulness of the umbrella species concept as a conservation tool [J]. *Conservation Biology*, 2004, **18**(1): 76 – 85.
- [16] BOWEN-JONES E, ENTWISTLE A. Identifying appropriate flagship species: the importance of culture and local contexts [J]. *Oryx*, 2002, **36**(2): 189 – 195.
- [17] WALPOLE M J, LEADER-WILLIAMS N. Tourism and flagship species in conservation [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2002, **11**(3): 543 – 547.
- [18] 李晓文, 张玲, 方精云. 指示种、伞护种与旗舰种: 有关概念及其在保护生物学中的应用[J]. 生物多样性, 2002, **10**(1): 72 – 79.
LI Xiaowen, ZHANG Ling, FANG Jingyun. Indicator, umbrella and flagship species: the concepts and their applications in conservation biology [J]. *Biodiversity Science*, 2002, **10**(1): 72 – 79.
- [19] 梅昭利, 曹成全, 童超, 等. 不同温度对三叶虫萤卵孵化和初孵幼虫发育的影响[J]. 环境昆虫学报, 2020, **42**(2): 306 – 310.
MEI Zhaoli, CAO Chengquan, TONG Chao, *et al.* Effects of different temperatures on the hatching of eggs and development of newly hatched larvae of *Emeia pseudosauteri* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, **42**(2): 306 – 310.
- [20] 范良榜. 丽水九龙国家湿地公园昆虫资源调查及分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
FAN Liangbang. *Investigation and Analysis of Insect Resources in Lishui Jiulong National Wetland Park* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [21] 黄海凤, 林春绵, 姜理英, 等. 丽水市大溪水环境承载力及对策研究[J]. 浙江工业大学学报, 2004, **32**(2): 41 – 46.
HUANG Haifeng, LIN Chunmian, JIANG Liying, *et al.* Study on water environment carrying capacity and counter measures in Daxi River in Lishui City [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2004, **32**(2): 41 – 46.

- [22] 张丽娟. 丽水湿地资源的现状分析及保护措施[J]. *低碳地产*, 2016, 2(5): 271 – 273.
ZHANG Lijuan. Analysis of the current situation of wetland resources in Lishui and protection measures [J]. *Low Carbon Estate*, 2016, 2(5): 271 – 273.
- [23] 李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. *世界林业研究*, 2008, 21(1): 40 – 46.
LI Yongning, ZHANG Binlan, QIN Shuying, *et al.* Review of research and application of forest canopy closure and its measuring methods [J]. *World Forestry Research*, 2008, 21(1): 40 – 46.
- [24] 李相逸, 曹磊, 马超, 等. 天津滨海滩涂湿地鸟类丰富度与环境因子的关系研究[J]. *风景园林*, 2018, 25(6): 107 – 112.
LI Xiangyi, CAO Lei, MA Chao, *et al.* Research on avian abundance and their correlation with environmental variables at coastal wet-land in Tianjin [J]. *Landscape Architecture*, 2018, 25(6): 107 – 112.
- [25] TOMITA M, ITOH K, KATOH K. Regional comparison of environmental factors influencing distribution of Genji-firefly *Luciola cruciata* [J]. *Journal of the Japanese Institute of Landscape Architecture*, 2006, 69(5): 557 – 560.
- [26] 罗宜富, 李磊, 李秋华, 等. 阿哈水库叶绿素a时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2017, 38(10): 4151 – 4159.
LUO Yifu, LI Lei, LI Qiuhua, *et al.* Spatial and temporal distribution of chlorophyll a and its relationship to algae and environmental factors in Aha Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4151 – 4159.
- [27] TAKEDA M, AMANO T, KATOH K, *et al.* The habitat requirement of the Genji-firefly *Luciola cruciata* (Coleoptera: Lampyridae), a representative endemic species of Japanese rural landscapes [M]// HAWKSWORTH D L, BULL A T. *Arthropod Diversity and Conservation: Topics in Biodiversity and Conservation*. Dordrecht: Springer, 2006, 15: 177 – 189.
- [28] 邱明宇. 串珠藻科植物地理分布及与环境因子的关系[D]. 太原: 山西大学, 2021.
QIU Mingyu. *Geographical Distribution and Relationship with Environmental Factors of Batrachospermaceae* [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [29] LEWIS S M, CRATSLEY C K. Flash signal evolution, mate choice, and predation in fireflies [J]. *Annual Review of Entomology*, 2008, 53: 293 – 321.
- [30] YUMA M. Effects of illuminance and tree coverage on the density of adult Genji-firefly, *Luciola cruciata* (Coleoptera) [J]. *Ecology and Civil Engineering*, 2001, 4(1): 59 – 63.
- [31] MØLLER A P. Long-term trends in wind speed, insect abundance and ecology of an insectivorous bird[J/OL]. *Ecosphere*, 2013, 4(1): 1 – 11 [2022-08-26]. doi: 10.1890/ES12-00310.1.
- [32] 卢聪聪, 童超, 曹成全, 等. 不同环境和介质对三叶虫萤卵孵化的影响[J]. *生物资源*, 2017, 39(5): 386 – 388.
LU Congcong, TONG Chao, CAO Chengquan, *et al.* Effect of different environments and materials on the hatching of *Emeia pseudosauteri* eggs [J]. *Biotic Resource*, 2017, 39(5): 386 – 388.