

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2020.03.005

水稻生育期对稻水象甲成虫种群 空间格局影响及抽样技术

杨春林¹, 李洪浩^{2*}, 牟成君³, 王 锐⁴, 席亚东²

¹四川省乐山市植保植检站, 四川 乐山 614000; ²四川省农业科学院植物保护研究所, 四川 成都 610066;
³四川省乐山市种子管理站, 四川 乐山 614000; ⁴四川省乐山市农技推广站, 四川 乐山 614000

摘要:【目的】明确四川省西南浅丘稻区稻水象甲成虫种群在水稻不同生育期的空间格局及抽样技术, 为获取准确稻水象甲虫情调查资料和制定有效的综合防控措施提供理论依据。【方法】调整水稻播栽时间, 错开 2 组试验田水稻的生育期, 用聚集度指标法、回归模型法和频次卡方检验法分析稻水象甲成虫种群的空间格局及水稻生育期对空间聚集特性的影响, 并对田间序贯抽样技术和抽样方法进行研究。【结果】不同田块稻水象甲成虫平均密度为 0.48~5.83 头·丛⁻¹, 分蘖期水稻田虫口密度显著高于抽穗期。稻水象甲成虫在不同水稻生育期稻田间呈负二项聚集分布, 基本成分为个体群, 个体间相互吸引, 聚集强度随种群密度的升高而增加。当种群密度较低时, 其聚集由环境因素引起; 种群密度较高时, 其聚集为其自身的聚集习性与环境因素共同引起。双对角线抽样法是稻水象甲成虫田间抽样的最佳方法, 当稻水象甲成虫防治指标为 1 头·丛⁻¹时, Iwao 序贯抽样模型为 $T_{1(n)}, T_{0(n)} = n \pm 1.96 \sqrt{2.286n}$, 结合 Kuno 序贯抽样模型建立了用于田间抽样的复序贯抽样图。【结论】稻水象甲成虫在不同水稻生育期稻田间呈负二项聚集分布, 分蘖期水稻田虫口密度显著高于抽穗期, 双对角线抽样法是稻水象甲成虫田间抽样的最佳方法。

关键词: 水稻生育期; 稻水象甲; 成虫种群; 空间格局; 抽样技术



开放科学标识码
(OSID 码)

Effect of rice growth period on population spatial pattern of rice water weevil and sampling technique

YANG Chunlin¹, LI Honghao^{2*}, MU Chengjun³, WANG Rui⁴, XI Yadong²

¹Leshan Plant Protection and Quarantine Station of Sichuan Province, Leshan, Sichuan 614000, China; ²The Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China; ³Leshan Seed Management Station of Sichuan Province, Leshan, Sichuan 614000, China; ⁴Leshan Agricultural Technology Promotion Station of Sichuan Province, Leshan, Sichuan 614000, China

Abstract: 【Aim】 In this paper, the spatial pattern of *Lissorhoptrus oryzophilus* adult populations were examined through the use of different sampling techniques and timing of rice planting in the shallow hilly rice area of Southwest Sichuan Province. The results aimed to provide a scientific basis for obtaining accurate survey data of rice water weevil and formulating effective comprehensive control measures. 【Method】 The growth periods of rice in two experimental fields were staggered by adjusting their planting time. The spatial pattern of *L. oryzophilus* adult populations and the effect of rice growth period on the spatial aggregation characteristics were analyzed by the methods of aggregation index, regression model and frequency chi square test. The sequential sampling technique and double diagonal sampling method were also tested in the field. 【Result】 The average density of *L. oryzophilus* adults in different fields was 0.48–5.83 heads/clump, and the population density at the tillering stage was significantly higher than that in heading stage. The adult populations of *L. oryzophilus* had an aggregated spatial pattern and fit to negative binomial distribution in rice fields of different growth periods. The basic component of distribution was individual group, which attracted each other, and the

收稿日期 (Received): 2020-01-06 接受日期 (Accepted): 2020-02-26

基金项目: 四川省科技计划项目 (2016NYZ0053); 国家现代农业产业技术体系四川创新团队项目 (川农函〔2019〕472 号); 四川省乐山市重点科技计划课题 (12NZD070)

作者简介: 杨春林, 男, 硕士。研究方向: 昆虫生态及农业病虫害综合防控。E-mail: 175900712@qq.com

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: 374877381@qq.com

aggregation intensity increased with the increase of population density. The aggregation was associated with environmental factors at low population density, while at high population density, aggregation was associated with the habit of the pest and environmental factors. The double diagonal sampling method was the best method for field sampling of *L. oryophilus* adults. The Iwao's sequential sampling model was $T_{1(n)}, T_{0(n)} = n \pm 1.96 \sqrt{2.286n}$, combined with Kuno's sequential sampling figure, the multiple sequential sampling figure for field sampling was established, under control threshold of *L. oryophilus* adults with 1 head/clump. 【Conclusion】 The adult populations of *L. oryophilus* had an aggregated spatial pattern and fit to negative binomial distribution in rice fields of different growth period, and the population density in tillering stage was significantly higher than that in heading stage. The double diagonal sampling method was the best method for field sampling of *L. oryophilus* adults.

Key words: rice growth period; *Lissorhoptrus oryophilus*; adult population; spatial pattern; sampling technique

稻水象甲 *Lissorhoptrus oryophilus* Kusehel 是中国进境植物检疫性有害生物和全国农业植物检疫性有害生物(中华人民共和国农业部,2009),该虫适生范围广、扩散能力强、扩散速度快(丁新华等,2017),成虫取食上表皮及叶肉组织,在叶片上形成灰白色条斑,幼虫则钻蛀根内取食,或直接咬断稻根,造成水稻植株长势变缓、生育期延长(王小武等,2018),甚至造成水稻坐兜或形成浮秧(何永福等,2013),一般可导致水稻减产 20%~30%,严重时可达 50%以上,甚至绝收(蔡明等,2000)。稻水象甲起源于北美洲中南部密西西比河流域,1976 年进入日本后扩散到朝鲜半岛(邱良妙等,2007)。自 1988 年首次在河北省唐山市发现以来,稻水象甲在我国沿渤海湾迅速扩散蔓延,目前已涉及 23 个省(区、市)463 个县(市、区)(丁新华等,2019),在部分地区已成为水稻的主要害虫之一。四川省 2011 年首次在内江地区发现稻水象甲入侵(何春兰和何军,2013),随后该虫迅速在全省扩散,截至 2018 年底,四川省共有 16 个市州 54 个县(市、区)发生,发生面积近 66.7 万 hm^2 (四川省农业农村厅,2018)。稻水象甲蔓延速度快、危害损失重、对环境的适应能力强,防治难度很大,若得不到有效控制将严重威胁本地区水稻生产。

生物种群空间是指生物种群的栖居场所,即生境,种群空间格局则是该生物种群在其生境空间的分布结构,是显示物种种性的生态学性质之一(沈佐锐和管致和,1986),常常影响种群的内部结构和个体行为(蔡小明,1991)。科学开展抽样调查,准确获取农业昆虫的种群密度是实施有害生物综合治理方案的先决条件,而抽样方法的理论基础之一是种群的空间格局。因此,研究稻水象甲种群的空间格局对制定科学的调查取样方案、综合防治策略具有重要意义(于新文和刘晓云,2001)。目前,国

内已有贵州(嵇薇等,2013)、新疆(王小武等,2017)、广西(张燕杏等,2016)等省份(自治区)报道了稻水象甲种群空间分布规律及抽样技术的研究,四川省未见相关报道。由于农业昆虫种群的空间格局受地理环境、耕作习惯和栽培方式、寄主植物种类及发育阶段等外部因素影响(嵇薇等,2013),现有研究结果的应用具有一定局限性。稻水象甲防治经验表明,稻水象甲成虫的有效防控是控制疫情蔓延和减轻危害的关键(周社文等,2006)。本试验于 2019 年对四川西南浅丘稻区稻水象甲成虫种群空间格局进行了研究,探讨了水稻 2 个重要时期,即分蘖期和抽穗期对稻水象甲成虫种群空间聚集特性的影响,提出了操作简便、快捷的大田抽样技术,并运用模拟抽样的方法比较不同抽样方法的适合性与代表性,以期获取准确的虫情调查资料,制定综合防控措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于四川省乐山市井研县天云乡瓦子坳村(E103°55'3",N29°51'29")。井研县位于四川盆地西南,县城北距成都市 142 km,西至乐山市 37 km,东南至自贡市 118 km,与仁寿、青神、荣县、犍为、五通桥、市中区等地接壤。井研县地势低矮,海拔高程在 380~450 m;丘陵广布,溪沟纵横。井研属四川盆地中亚热带湿润气候区,气候温暖湿润,年平均气温 17.2℃,年平均日照总数 1134.6 h,年平均降雨量 1025.8 mm。

1.2 试验设计与调查方法

在常年发生稻水象甲疫情的区域选取 12 块相邻的稻田,随机分成 2 组,每组 6 块田,第 1 组 3 月 22 日播种水稻,5 月 1 日移栽;第 2 组 5 月 10 日播种,6 月 10 日移栽,均采用水育秧方式。2019 年 6 月 25 日稻水象甲 1 代成虫羽化盛期,调查所有田

块稻水象甲成虫,采用平行取样法,将每块田均分为100等份,即10行10列,于行列交汇处取1丛水稻,共100丛,调查水稻叶片上及根基处所有稻水象甲成虫并计数。试验区水稻主栽品种为宜香优2115、晶两优1377,水稻丛距20 cm,行距30 cm,种植密度0.7~0.8万株·hm⁻²。

1.3 空间分布型测定

1.3.1 聚集度指标法 统计调查数据,计算不同田块稻水象甲成虫平均密度值 m (头·丛⁻¹) 和方差 S^2 ,依据6个指标进行判断:(1)Beall 扩散系数: $C=S^2/m$;(2)David 和 Moore 的丛生指标: $I=S^2/-1$;(3)平均拥挤度: $m^*=m+S^2/m-1$;(4)Lloyd 聚块性指数: $m^*/m=(m+S^2/m-1)/m$;(5)Cassie 的聚集度指数: $C_A=(S^2-m)/m^2$;(6)Waters 负二项分布 K 值: $K=m^2/(S^2-m)$ 。各个聚集度指标的计算及判断标准参考阎雄飞等(2019)。

1.3.2 负二项分布拟合检验 负二项分布概率密度函数 $P(x)=(Q-P)^{-K_c}$,分别用矩法、频数法、零频率法和最大似然法估算负二项分布公共 K_c 值(沈佐锐,1992),按 $P=\bar{X}/K_c$ 、 $Q=1+P$ 求得 P 、 Q ;按 $F_0=NQ^{-K_c}$ 和各项频数递推式 $F_r=F_{r-1}[(K+r-1)/r]$ (P/Q),求得理论频数 F ;按拟合检验公式 $\chi^2=|F-f|^2/F$ 进行拟合优度检验。

1.3.3 回归模型法 Taylor 幂法则(Taylor *et al.*, 1961):Taylor 提出的样本平均数(m)与方差(S^2)对数值之间的回归关系公式 $\lg S^2=a+b\lg m$ 。其中 a 是一个与样本大小和计算方法有关的因子,受环境异质性的影响; b 为聚集特征指数,其指示聚集度与种群密度依赖性的关系。当 $a=0, b=1$,说明种群为随机分布;当 $a>0, b=1$,说明种群为聚集分布;当 $a<0, b<1$ 时,种群密度越高分布的越均匀;当 $a>0, b>1$,说明种群在一切密度下均是聚集分布,且聚集性具有密度依赖性,即 m 越大种群聚集度越高。

Iwao 的 m^*-m 回归分析法(Iwao *et al.*, 1968): m^*-m 的回归方程为 $m^*=\alpha+\beta m$,其中常数 α 和 β 揭示种群的分布特征, α 为分布的基本成分按大小分布的平均拥挤度, β 为基本成分的空间分布图示。当 $\alpha=0$ 时,分布的基本成分为单个个体; $\alpha>0$,分布的基本成分是个体间相互吸引的个体群; $\alpha<0$,个体间相互排斥。当 $\beta<1$ 时,为均匀分布; $\beta=1$,为随机分布; $\beta>1$,为聚集分布。

1.4 聚集原因分析

根据 Blackith (1958)提出的种群聚集均数(λ)法分析稻水象甲成虫的聚集原因,聚集均数公式为 $\lambda=m\gamma/2k$, γ 为自由度等于 $2k$ 的 χ^2 (卡方)分布函数,即 γ 等于“ χ^2 值表”中自由度等于 $2k$ 与概率($p=0.05$)对应的值,由于 $2k$ 常为小数,因此值可用比例内插法求得。当 $\lambda<2$ 时,昆虫聚集原因只可能是某些环境因素所致;当 $\lambda\geq 2$ 时,昆虫聚集原因是昆虫本身的聚集习性或与环境因素综合作用所致。

1.5 抽样技术

1.5.1 理论抽样数模型 根据王小强等(2017),Southwood 的 K_c 法: $n=(\frac{t}{D})^2(\frac{1}{m}+\frac{1}{K_c})$,式中 n 为理论抽样数; K_c 为负二项分布公共 K 值; t 为一定置信度下 t 分布值; D 为允许误差。

Iwao 回归法: $n=(\frac{t}{D})^2[\frac{\alpha+1}{m}+\beta-1]$,式中 n 为理论抽样数; α 、 β 为 Iwao 回归方程式中的参数; t 为一定置信度下 t 分布值; D 为允许误差。

Taylor 幂法: $n=(\frac{t}{D})^2 am^{b-2}$,式中 n 为理论抽样数; a 、 b 为 Taylor 幂方程式中的参数; t 为一定置信度下 t 分布值; D 为允许误差。

1.5.2 序贯抽样模型 Iwao 序贯抽样模型(孙小旭等, 2019): $T_{1(n)}, T_{0(n)}=nm_0\pm t\sqrt{n[(\alpha+1)/m_0+(\beta-1)m_0^2]}$ 。式中, $T_{1(n)}$ 为累计虫数上限, $T_{0(n)}$ 为累计虫数下限; m_0 为防治指标; t 为分布临界值,取 $t=1.96$; n 为抽样数; α 、 β 为 Iwao 回归方程式中的参数。

Kuno 序贯抽样模型(王小强等, 2013): $T_n=\frac{\alpha+1}{D^2-\frac{\beta-1}{n}}, n>(\frac{\beta-1}{D^2})$ 。式中, T_n 停止抽样累计虫数; D

为精确度; α 、 β 为 Iwao 回归方程式中的参数。

1.6 抽样方法比较

选取一形状方正的稻田,对稻水象甲成虫进行全田普查(逐行逐丛进行调查),将调查数据填入 Excel 表格,制成田间实际分布图。分别用五点抽样法、棋盘式抽样法、双对角线抽样法、Z 形抽样法、平行线抽样法在空白 Excel 表上进行模拟抽样,每种方法调查 30 丛水稻,以田间实际分布情况作为参照进行单样本 T 检验,确定最佳抽样方法。

1.7 数据处理

运用 SPSS Statistics 25 软件进行方差分析、频率统计和单样本 T 检验,采用 Duncan 氏新复极差法检测差异显著性;用 Excel 2003 进行简单运算并绘图。

2 结果与分析

2.1 空间格局判定

2.1.1 聚集度指标测定 在第 1 代稻水象甲成虫羽化盛期调查时,第 1 组水稻正处于抽穗期,第 2 组水稻处于分蘖期。调查结果显示,所有调查田块(12 个田块)稻水象甲成虫平均密度为 0.48~5.83 头·丛⁻¹,分蘖期水稻田虫口平均密度显著高于抽

穗期。由表 1 可看出,所有田块的平均拥挤度 m^* 均大于 m ,聚块性指数 m^*/m 、扩散系数 C 均大于 1;David 和 Moore 的 I 指标、Cassie 指标 C_A 均大于 0;负二项分布 K 值大于 0 小于 8。上述各指标表明所调查田块稻水象甲成虫种群均呈聚集分布。且处于水稻分蘖期田块的平均拥挤度 m^* 、扩散系数 C 、David 和 Moore 的 I 指标和负二项分布 K 值明显大于水稻抽穗期田块,而聚块性指数 m^*/m 和 Cassie 指标 C_A 值则相反,表明同一时间,处于不同生育阶段稻田中稻水象甲成虫的田间聚集行为具有差异性。

表 1 稻水象甲成虫的聚集度指标
Table 1 Aggregation index of *L. oryzaephilus* adult

组别 Group	编号 Number	平均密度 $m/(\text{头} \cdot \text{丛}^{-1})$ Average density	方差 S^2 Variance	平均拥挤度 m^* Mean crowding	扩散系数 C Diffusion coefficient	I 指标 I index
第 1 组(抽穗期) First group (heading stage)	1	0.76±0.14e	1.86	2.2087	2.4487	1.4487
	2	0.98±0.15de	2.30	2.3300	2.3500	1.3500
	3	0.48±0.10e	0.98	1.5196	2.0396	1.0396
	4	0.55±0.11e	1.26	1.8409	2.2909	1.2909
	5	0.94±0.14de	2.10	2.1709	2.2309	1.2309
	6	0.83±0.13e	1.82	2.0216	2.1916	1.1916
第 2 组(分蘖期) Second group (tillering stage)	7	1.73±0.23d	5.47	3.8930	3.1630	2.1630
	8	3.97±0.38bc	14.19	6.5446	3.5746	2.5746
	9	3.33±0.29c	8.43	4.8600	2.5300	1.5300
	10	5.83±0.53a	27.58	9.5602	4.7302	3.7302
	11	1.23±0.15d	2.24	2.0503	1.8203	0.8203
	12	4.69±0.39b	15.51	6.9968	3.3068	2.3068
总和 Total		2.11±0.09	10.05	5.8533	4.7266	3.7266

组别 Group	编号 Number	聚块性指数 Cluster index	Cassie 指标 C_A Cassie index	负二项分布 K Negative binomial distribution K	聚集均数 λ Gather mean number	分布类型 Distribution pattern
第 1 组(抽穗期) First group (heading stage)	1	2.9062	1.9062	0.5246	0.3628	聚集 Gather
	2	2.3776	1.3776	0.7259	0.5911	聚集 Gather
	3	3.1658	2.1658	0.4617	0.2184	聚集 Gather
	4	3.3471	2.3471	0.4261	0.2503	聚集 Gather
	5	2.3094	1.3094	0.7637	0.5822	聚集 Gather
	6	2.4356	1.4356	0.6966	0.4891	聚集 Gather
第 2 组(分蘖期) Second group (tillering stage)	7	2.2503	1.2503	0.7998	1.0958	聚集 Gather
	8	1.6485	0.6485	1.5420	3.1529	聚集 Gather
	9	1.4595	0.4595	2.1764	2.8365	聚集 Gather
	10	1.6398	0.6398	1.5629	4.6454	聚集 Gather
	11	1.6669	0.6669	1.4994	0.9700	聚集 Gather
	12	1.4919	0.4919	2.0331	3.9479	聚集 Gather
总和 Total		2.7523	1.7523	0.5707	1.0930	聚集 Gather

相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$, Duncan 氏法)。
The data (means±SD) in the same column with the same letters mean no significant differences at 5% level (Duncan's).

2.1.2 Taylor 幂法则 根据表 2 数据,将方差 S^2 和平均密度 m 作对数转换,得水稻分蘖实验组稻水象

甲成虫的 S^2-m 回归方程为 $\lg S^2 = 0.2766 + 1.4336 \lg m$ ($R = 0.9535^{**}$),抽穗实验组为 $\lg S^2 = 0.3681 + 1.111 \lg m$ ($R = 0.9728^{**}$)。方程的截距 a 均大于 0,

斜率值 b 均大于 1,说明在 2 种水稻生育期条件下,稻水象甲成虫种群均呈具密度依赖性的聚集分布,即 m 越大种群聚集度越高。分蘖期稻田的斜率($b = 1.4669$)大于抽穗期稻田($b = 1.3121$),说明种群密度越高,聚集度对密度 m 的变化越敏感。将 2 组稻田作为一个样本总体进行回归分析,得回归方程: $\lg S^2 = 0.3747 + 1.2571m$ ($R = 0.9795^{**}$),说明水稻生育期的差异可能会影响成虫的种群密度,但不会影响其空间格局。

2.1.3 Iwao 的 m^*-m 回归分析 分蘖期稻田稻水象甲成虫的 m^*-m 线性回归方程为 $m^* = 0.5706 + 1.4669m$ ($R = 0.9568^{**}$);抽穗期稻田为 $m^* = 1.0224 + 1.3121m$ ($R = 0.8203^*$);样本总体回归方程为 $m^* = 0.8925 + 1.3936m$ ($R = 0.9770^{**}$)。其中截距 α 均大于 0,可认为水稻不同生育期条件下稻水象甲成虫在田间分布的基本成分为个体群,个体间相互吸引;斜率值 β 均大于 1,表明稻水象甲成虫总体呈聚集分布。因为分蘖期稻田虫口密度较高,加

之分蘖期稻田的斜率($\beta = 1.4669$)大于抽穗期稻田($\beta = 1.3121$),说明由于个体间的相互吸引效应,分蘖期稻田的稻水象甲成虫种群聚集度高于抽穗期稻田,结果与 Taylor 幂法则判定相一致。

2.1.4 负二项分布拟合优度检验 调查样本数 $N = 1200$ (丛),稻水象甲成虫平均密度 $= 2.11$ (头·丛⁻¹),样本总体方差为 $S^2 = 10.05$,单丛水稻虫量为 0~19 头·丛⁻¹,样内各虫量实际分布情况及计算结果见表 2。结果表明,运用矩法估计的负二项公共 K_c 值为 0.5707,明显大于频数法(0.4618)、零频率法(0.4716)和最大似然法(0.4713)。矩法估算 K_c 值检验得($\chi^2 = 0.3701$)>($\chi^2_{0.01,16} = 32$)($P < 0.01$),说明稻水象甲成虫种群不符合负二项分布模型;频数法、零频率法和最大似然法的 χ^2 分别为 20.71、21.60和 21.96,均小于 $\chi^2_{0.1,16} = 23.542$,证实符合负二项分布($P > 0.1$),说明负二项 K_c 值的估计方法对拟合优度检验结果具有较大的影响。

表 2 稻水象甲成虫的负二项分布拟合优度检验											
Table 2 Goodness of fit test of negative binomial distribution of <i>L. oryzaephilus</i> adults											
序号 Serial number	样内 虫量 Insects number/ 头	实际 频数 Actual frequency	AR	矩法 Moments method		频数法 Frequency method		零频率法 Zero frequency method		最大似然法 Maximum likelihood method	
				理论频数 Theoretical frequency	χ^2	理论频数 Theoretical frequency	χ^2	理论频数 Theoretical frequency	χ^2	理论频数 Theoretical frequency	χ^2
1	0	549	651	489.12	7.33	536.40	0.30	531.48	0.58	529.68	0.70
2	1	208	443	221.22	0.79	204.41	0.06	206.06	0.02	206.69	0.01
3	2	102	341	138.88	9.80	123.29	3.68	124.64	4.11	125.18	4.29
4	3	81	260	95.14	2.10	83.49	0.07	84.42	0.14	84.79	0.17
5	4	56	204	67.89	2.08	59.62	0.22	60.23	0.30	60.48	0.33
6	5	42	162	49.61	1.17	43.90	0.08	44.29	0.12	44.45	0.13
7	6	34	128	36.82	0.22	32.98	0.03	33.20	0.02	33.30	0.01
8	7	32	96	27.63	0.69	25.12	1.88	25.23	1.81	25.29	1.78
9	8	16	80	20.90	1.15	19.34	0.58	19.37	0.59	19.40	0.60
10	9	26	54	15.91	6.40	15.00	8.06	14.99	8.08	15.00	8.07
11	10	17	37	12.17	1.91	11.71	2.39	11.67	2.43	11.67	2.44
12	11	11	26	9.35	0.29	9.19	0.36	9.14	0.38	9.12	0.39
13	12	8	18	7.21	0.09	7.25	0.08	7.18	0.09	7.16	0.10
14	13	7	11	5.57	0.37	5.73	0.28	5.66	0.32	5.64	0.33
15	14	2	9	4.32	1.24	4.55	1.43	4.48	1.37	4.46	1.36
16	15	4	5	3.35	0.12	3.62	0.04	3.55	0.06	3.53	0.06
17	17	4	1	2.61	0.74	2.89	0.43	2.83	0.48	2.81	0.50
18	19	1	0	2.04	0.53	2.32	0.75	2.26	0.70	2.24	0.69
参数值 Parameter value				K_c	0.5707		0.4618		0.4716		0.4713
				P	3.8199		4.7208		4.6226		4.5866
				Q	4.8199		5.7208		5.6226		5.5866
拟合检验 Fitting test				χ^2	37.01		20.71		21.60		21.96
				P	<0.01		>0.1		>0.1		>0.1

2.2 聚集原因分析

按照 Blackith 提出的种群聚集均数(λ)法,根据表 2 中的负二项分布 K 值和样本平均密度 m ,采用比例内插法算出自由度 $2k$ 时的估计值,最后求得聚集均数 λ 值。将表中的平均密度 m 与聚集均数 λ 作线性回归分析,得 $\lambda = -0.2199 + 0.8603m$ ($R = 0.9952^{**}$),表明聚集均数与种群密度呈显著正相关(图 1)。将 $\lambda = 2$ 代入方程式,得 $m = 2.58$,即当稻水象甲成虫种群密度 $m < 2.58$ 时,其聚集是由环境作用所引起;当稻水象甲成虫种群密度 $m \geq 2.58$ 时,其聚集为其自身的聚集习性与环境因素综合作用所致。

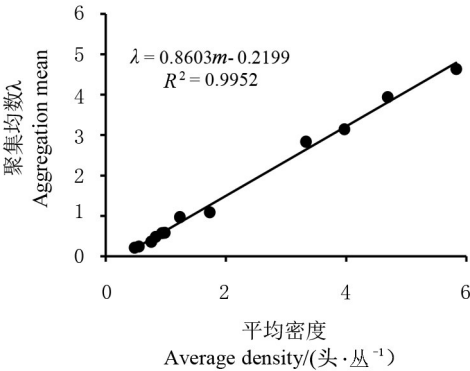


图 1 聚集均数与平均密度的线性回归关系
Fig.1 Linear regression relationship between aggregate mean and average density

2.3 抽样技术

2.3.1 理论抽样技术 Southwood 的 K_c 法:采用最

大似然法估算的公共 $K_c = 0.4716$,则有模型 $n = (\frac{t}{D})^2(\frac{1}{m} + \frac{1}{0.4716})$, D 取 0.1、0.2、0.3, $t = 1.96$,下同。

Iwao 回归法:根据表 2 中平均密度 m 和平均拥挤度 m^* ,进行 Iwao 的 $m^* - m$ 回归分析,得样本总体回归方程为 $m^* = 0.8925 + 1.3936m$ ($R = 0.9770^{**}$)。将截距 $\alpha = 0.8925$ 、斜率 $\beta = 1.3936$ 代入抽样模型,则有 $n = (\frac{t}{D})^2(\frac{0.8925+1}{m} + 0.3936)$ 。

Taylor 幂法:本试验样本总体 $S^2 - m$ 回归方程为 $\lg S^2 = 0.3747 + 1.2571m$ ($R = 0.9795^{**}$),将截距 $a = 0.3747$ 、斜率 $b = 1.2571$ 代入抽样模型,则有 $n = (\frac{t}{D})^2 0.3747^{-0.7429}$ 。

通过 Southwood 的 K_c 法、Iwao 回归法及 Taylor 幂法理论抽样模型分别求得稻水象甲成虫在不同种群密度和精度要求下的理论抽样数 n (表 3)。结果表明,不同理论抽样模型得出的理论抽样数差异明显,其中 Iwao 回归法的理论抽样数最高, Taylor 幂法的理论抽样数最低,且 3 种方法的理论抽样数均随种群密度(m)和估计精度(D)值的增高而逐渐减小。在实际应用中, D 值可根据实际情况进行调整,当种群密度较低时抽样数较大,可将 D 值取大些(如 0.3),当种群密度较高时,应将 D 值取小些(如 0.1)以提高抽样精度。

表 3 稻水象甲成虫种群理论抽样表
Table 3 Theoretical sampling table of adult population of *L. oryophilus*

种群密度 Population density/ (头·丛 ⁻¹)	Southwood 的 K_c 法 Southwood's K_c method			Iwao 回归法 Iwao's regression method			Taylor 幂法 Taylor's power method		
	$D = 0.1$	$D = 0.2$	$D = 0.3$	$D = 0.1$	$D = 0.2$	$D = 0.3$	$D = 0.1$	$D = 0.2$	$D = 0.3$
0.1	4657	1164	517	7421	1855	825	796	199	88
0.3	2096	524	233	2575	644	286	352	88	39
0.5	1583	396	176	1605	401	178	241	60	27
0.7	1364	341	152	1190	297	132	188	47	21
0.9	1242	310	138	959	240	107	156	39	17
1.1	1164	291	129	812	203	90	134	34	15
1.3	1111	278	123	710	178	79	118	30	13
1.5	1071	268	119	636	159	71	107	27	12
1.7	1041	260	116	579	145	64	97	24	11
1.9	1017	254	113	534	133	59	89	22	10
2.1	998	250	111	497	124	55	83	21	9
2.5	969	242	108	442	111	49	73	18	8
3.0	943	236	105	394	98	44	64	16	7
3.5	925	231	103	359	90	40	57	14	6
4.0	911	228	101	333	83	37	51	13	6
4.5	900	225	100	313	78	35	47	12	5
5.0	892	223	99	297	74	33	44	11	5

2.3.2 复序贯抽样技术 应用 Iwao 序贯抽样模型,取 $t=1.96$,防治指标 $m_0=1$ 头·丛⁻¹(狄雪塬等,2015),则有公式: $T_{1(n)}, T_{0(n)}=n\pm 1.96\sqrt{2.286n}$;应用 Kuno 序贯抽样模型,取 $D=0.2、0.25、0.3, t=1.96$,则有公式: $T_n=\frac{1.8925}{D^2-\frac{0.3936}{n}}, (n>\frac{0.3936}{D^2}), D=0.2, 0.25, 0.3$ 。当 $n=15, 20, 30, 40\cdots\cdots 150$,得出 2 种序贯抽样模型下的序贯抽样数(表 4)。

根据序贯抽样序列表,分别绘制出稻水象甲成虫 Iwao 序贯抽样上、下限($T_{1(n)}, T_{0(n)}$)和 Kuno 序贯抽样截止线($D=0.2, 0.25, 0.3$),组成复序贯抽样图(图 2)。按照 Iwao 序贯抽样技术,若稻水象甲成虫调查累计虫数 $T_n>T_{1(n)}$,则应定为防治对象田;若 $T_n<T_{0(n)}$,则无需防治;若 $T_{0(n)}<T_n<T_{1(n)}$,应继续抽样调查。当抽样数超过 Kuno 序贯抽样截止线时,无论是否达到 Iwao 序贯抽样方法的上、下限

线,都要停止抽样,若此时累计虫数靠近 Iwao 序贯抽样上限值则需要防治,否则无需防治。Iwao 序贯抽样下限线 $T_{0(n)}$ 与 Kuno 序贯抽样截止线交点的横坐标即为最大抽样数,实际操作中估计精度则遵从 Kuno 抽样精度。例:取 $D=0.2$,当调查水稻 50 丛时,若稻水象甲成虫数量累计达到 71 头(上限),则需要进行防治;若累计成虫数量低于 29 头(下限),则不需要防治;若成虫累计虫量介于 71 和 29 之间,则需要继续抽样调查,此时,抽样所需最大样本数为 Kuno 截止线与 Iwao 的下限线($T_{0(n)}=n-1.96\sqrt{2.286n}$)的交点落在的横坐标值,即 $n=80$,此时的累计虫数除以抽样数即是田间稻水象甲成虫平均密度。由于稻水象甲成虫在不同地区及不同水稻生育期防治指标存在一定差异,实际应用中可将不同的防治指标代入 Iwao 序贯抽样模型,再根据 Kuno 序贯抽样截止线绘制出对应的抽样图。

表 4 稻水象甲成虫种群理论抽样表
Table 4 Sequential sampling sequence of *L. oryzaophilus* adults

序贯抽样技术 Sequential sampling technique		抽样数 Sampling number/丛														
		15	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Iwao	上限 Uper limit	22	33	46	59	71	83	95	107	118	130	141	152	164	175	186
	下限 Lower limit	4	7	14	21	29	37	45	53	62	70	79	88	96	105	114
Kuno	$D=0.2$	195	93	70	63	59	57	55	54	53	52	52	52	51	51	51
	$D=0.25$	59	44	38	36	35	34	33	33	33	32	32	32	32	32	32
	$D=0.3$	32	27	25	24	23	23	22	22	22	22	22	22	22	22	22

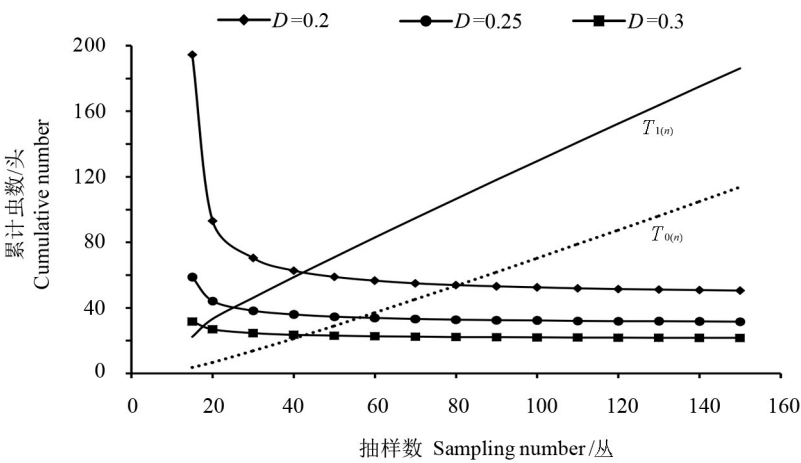


图 2 稻水象甲成虫复序贯抽样图
Fig.2 Complex sequential of *L. oryzaophilus* adults

2.3.3 抽样方法比较 分别对 5 种常用抽样方法进行模拟抽样比较,并分别将其与田间实际密度作单样本 T 检验(检验值 0.62),具体检验参数见表 5。各种抽样方法与检验值的均值差从小到大依次

为双对角线法(-0.0867)、平行线法(0.1476)、五点法(0.1800)、Z 形法(0.2800)、棋盘式法(0.6467),说明双对角线法抽样结果与实际值之间差异最小,棋盘式法抽样差异最大。所有调查方法的 sig 值

(双侧)均大于 0.05,表明几种抽样方法的结果与田间实际分布差异均不显著,均适用于稻水象甲成虫的田间抽样;其中,双对角线抽样法的适合性最好,平行线抽样法次之,棋盘式抽样法最差。综上所述可知,双对角线抽样法是稻水象甲成虫田间抽样的

最佳方法。由于水稻植株较密,人工抽样调查时会触碰植株和叶片造成稻水象甲成虫掉落或迁飞,从而影响调查结果,试验采用模拟抽样的方法,避免在同一块田反复调查造成人为误差。

表 5 稻水象甲成虫田间抽样方法比较
Table 5 Comparison of field sampling methods for *L. oryophilus* adults

抽样方法 Sampling method	抽样数 Sampling number/丛	平均成虫数 Sample mean/ (头·丛 ⁻¹)	标准差 Standard deviation	均值标准误差 Mean standard error	T-值 T-value	Sig 值 Sig value	平均成虫数 差值 Sample mean difference	差值 95% 置信区间 95% confidence interval	
								下限 Lower limit	上限 Upper limit
五点 Five point	30	0.8000	1.6274	0.2971	0.606	0.549	0.1800	-0.4277	0.7877
棋盘式 Checkerboard	30	1.2667	2.1645	0.3952	1.636	0.113	0.6467	-0.1616	1.4549
双对角线 Double diagonal	30	0.5333	1.4077	0.2570	-0.337	0.738	-0.0867	-0.6123	0.4390
Z 形 Z shape	30	0.9000	1.5833	0.2891	0.969	0.341	0.2800	-0.3112	0.8712
平行线 Parallel line	30	0.7667	1.3817	0.2523	0.581	0.565	0.1467	-0.3693	0.6626

3 讨论

研究生物种群空间格局常用的方法主要有聚集度指标判定法、回归模型分析法(Iwao 回归法、Taylor 幂法)、概率分布模型法(频数分布拟合 χ^2 检验法)等(王文琪等,2010)。目前,针对稻水象甲种群空间分布的研究主要集中在前 2 种方法,未见采用概率分布模型法的相关报道。本研究采用聚集度指标法和回归模型法分析水稻生育期对稻水象甲成虫的空间聚集特性的影响,并运用频次卡方检验法进行稻水象甲成虫种群负二项分布拟合优度检验,结果表明,稻水象甲成虫在不同水稻生育期稻田间呈负二项聚集分布,基本成分为个体群,个体间相互吸引,聚集强度随种群密度的升高而增加,且种群密度越高,聚集强度对种群密度的变化越敏感。与曲辉等(1998)在辽宁的研究相同,与巍薇等(2013)报道的贵州高原山地稻水象甲幼虫空间分布型基本一致,均为聚集分布。通过种群聚集均数法分析稻水象甲成虫聚集原因,结果表明,当稻水象甲成虫种群密度较低($m<2.58$)时,其聚集由环境作用引起;当稻水象甲成虫种群密度较高时($m\geq 2.58$),其聚集为其自身的聚集习性或与环境因素综合作用所致。

昆虫生态学研究常见的分布型主要是二项分布(均匀分布)、Poisson 分布(随机分布)、负二项分布(聚集分布),且在一定条件下不同分布型之间可能会相互转化(周国法和徐汝梅,1998)。研究昆虫分布规律时,要准确判断其空间格局是否符合负

二项分布,可利用估算的聚集性分布参数公共 K 值拟合理论频数,并结合实际频数作卡方检验进行验证。实际应用中估算 K 值方法较多,不同估计方法有时会对拟合效果造成是或否这种极端判断上的直接影响(张连翔等,1996)。在一些报道中,部分学者仅凭单一方法估算的 K 值大小即判定是否符合负二项分布(巍薇等,2013),其结论缺乏支撑,准确性值得商榷。本文采用常用的 4 种方法估算 K 值,结果表明,采用矩法证实稻水象甲成虫不是负二项分布($P<0.01$),频数法、零频率法和最大似然法则证实稻水象甲成虫符合负二项分布($P>0.05$)。在几种估算 K 值的方法中,矩法计算相对简单,但效率不高,最大似然法虽计算略繁琐,但结果最精确(王海银等,2009),因此在实际操作中当其他几种方法均不能作出准确判断时,则应采用最大似然法进行最后验证。

本试验通过调整水稻播栽时间的方法错开 2 组试验田水稻生育期,因推迟移栽的稻田在稻水象甲产卵和幼虫发育阶段无水生植物作为寄主,其虫源为第 1 代成虫羽化后迁入。将不同生育期稻田中的稻水象甲成虫种群分布型构成的连续动态系统作为研究对象,最大限度地消除了越冬成虫迁移、产卵习惯和幼虫聚集行为的影响,利于研究第 1 代成虫自身的种群空间分布规律。由于稻水象甲成虫取食具有一定的趋嫩性,分蘖期的水稻生长代谢旺盛,抽穗期的水稻叶片硬化程度较高,导致分蘖期稻田中稻水象甲成虫平均密度显著高于抽穗

期。研究发现,昆虫具有“分布的不确定性”,即1组资料可能同时符合几种分布模型,也可能不符合任何分布模型(张连翔等,1996)。本研究发现,当调查的所有田块稻水象甲成虫作为一个总体,即将12块稻田的所有调查数据作为一组资料时,符合负二项分布模型,当分别将抽穗期和分蘖期田块作为总体时,则均不符合负二项分布,其原因可能是在对应种群密度条件下样本量太小或分布的自由度达不到 χ^2 检验方法的要求。这一现象说明,虽然稻水象甲成虫种群的聚集度具有密度依赖性,但是种群密度或水稻生育期的差异不影响其负二项分布概率模型的拟合和描述。

昆虫从种群的建立到繁殖壮大,是一个种群密度不断增高的动态过程,新入侵昆虫种群的空间格局可能随繁殖和时间推移而变化,种群所有可能的分布类型在这个动态过程中组成了一端均匀分布,另一端高度聚集的连续系统(沈佐锐,1992)。稻水象甲自2011年入侵四川稻区,已经进行了近10年的繁殖、适应和进化,可认为该地区稻水象甲种群空间格局已经成型并达到稳定阶段。因此,根据本研究得出的稻水象甲成虫空间分布相关模型参数确立的稻水象甲成虫的抽样技术,对当前稻水象甲的防治和疫情监测具有指导意义。由于稻水象甲是迁飞性害虫,越冬代成虫在迁入稻田初期的分布规律易受边际效应影响,本研究结果在实际应用中有一定的局限性。另外,本次调查样本所在区域为典型的四川西南地区浅丘地貌,成都平原和川西高原地区的特殊地理环境和当地农事操作习惯对稻水象甲种群空间格局的影响有待进一步研究。

参考文献

蔡明,邢岩,赵铁成,宋雅坤,2000. 2000年稻水象甲大发生原因及控制对策. 辽宁农业科学(5): 36-37.
蔡小明,尚玉昌,阎桂云,陈济丁,阎浚杰,1991. 大白菜上七星瓢虫空间格局及抽样技术研究. 生态学杂志,10(5): 6-11.
丁新华,李超,王小武,付开赞,吐尔逊·阿合买提,黄红梅,木拉提·塔里木别克,何江,郭文超,2019. 稻水象甲在新疆的潜在分布及适生性研究. 生物安全学报,28(2): 116-120.
丁新华,王小武,吐尔逊·阿合买提,付开赞,何江,关志坚,付文君,郭文超,2017. 新疆荒漠绿洲稻区稻水象甲危害损失及防治阈值研究. 生物安全学报,26(1): 63-67.

狄雪源,杨茂发,徐进,严斌,韩畅,吉永权,黎行,2015. 贵州稻水象甲危害损失和防治指标研究. 应用昆虫学报,52(6): 1474-1481.
何春兰,何军,2013. 稻水象甲普查与防控技术措施. 四川农业科技(9): 40-41.
韩德坤,1992. 用微机检验昆虫空间分布型的拟合优度. 昆虫知识,29(6): 359-362.
何永福,廖国会,袁洁,陈小均,李凤良,程英,江兆春,胡吉锋,张忠民,2013. 不同药剂防治稻水象甲幼虫田间试验. 农药,52(1): 60-62.
刘刚,2015. 全国农技推广中心制定2015年稻水象甲防控技术方案. 农药市场信息,22(10): 50.
邱良妙,魏辉,傅建伟,吴玮,李建宇,占志雄,2007. 福建省稻水象甲分布与发生规律研究. 福建农业学报,22(2): 172-175.
曲辉,李腾,友江冬,丁秀云,王恩波,1998. 辽宁省稻水象甲成虫的空间分布型及抽样方法的研究. 沈阳农业大学学报,29(1): 30-33.
沈佐锐,1992. 负二项分布与昆虫种群空间分布格局的研究现状. 生物数学学报,7(1): 81-94.
沈佐锐,管致和,1986. 莱蚜种群空间格局动态的分析. 生物数学学报,1(1): 9-15.
四川省农业农村厅,2017. 全省农业植物检疫性有害生物分布名录. (2017-10-30)[2019-12-06]. <http://policy.wugu.com.cn/article/1136543.html>.
孙小旭,赵胜园,靳明辉,赵慧媛,李国平,张浩文,姜玉英,杨现明,吴孔明,2019. 玉米田草地贪夜蛾幼虫的空间分布型与抽样技术. 植物保护,45(2): 13-18.
王海银,张志杰,周艺彪,姜庆五,2009. 湖南省洞庭湖区钉螺分布状态的动态分析. 复旦学报(医学版),36(2): 138-141, 148.
王文琪,张伟,陶热,甘金莲,2010. 松褐天牛成虫野外空间格局. 中国农学通报,26(17): 256-259.
王小强,胡靖,陈威,刘长仲,2013. 高山草原蝗虫空间格局及抽样技术研究. 中国草地学报,35(6): 92-97.
王小强,刘虹伶,蒲德强,王勇,刘东阳,卢军,周肆维,李斌,刘杨,2017. 四川凉山烟区烟蚜种群空间分布型及抽样技术研究. 中国烟草科学,38(6): 34-40.
王小武,丁新华,付开赞,吐尔逊·阿合买提,黄红梅,木拉提·塔里木别克,何江,郭文超,2017. 小型植保无人机超低量喷雾防治稻水象甲. 生物安全学报,27(3): 216-223.
王小武,丁新华,吐尔逊·阿合买提,付开赞,何江,李广阔,高海峰,白微微,郭文超,2017. 新疆荒漠绿洲稻区稻水象甲幼虫、蛹的空间分布型及抽样技术. 西北农业学报,26(9): 1385-1394.
巍薇,杨茂发,廖启荣,杨洪,陈文龙,2013. 两种育秧方

- 式下稻水象甲幼虫的空间分布型及其抽样技术. 植物保护学报, 40(2): 128-132.
- 阎雄飞, 蒲泰勋, 李刚, 刘永华, 2019. 枣飞象成虫在陕北枣区空间分布型及抽样技术. 应用昆虫学报, 56(3): 585-594.
- 于新文, 刘晓云, 2001. 昆虫种群空间格局的研究方法评述. 西北林学院学报, 16(3): 83-87.
- 张连翔, 温豁然, 吕尚彬, 刘淑娟, 秦辉, 刘朝晖, 1996. 昆虫种群空间格局研究中的几个检验问题. 西北林学院学报, 11(3): 59-65.
- 张燕杏, 王凯学, 石桥德, 陆温, 2016. 2 种移栽方式下稻水象甲幼虫的空间分布型及抽样技术研究. 华南农业大学学报, 37(1): 58-62.
- 中华人民共和国农业农村部, 2009. 中华人民共和国农业
- (上接第 180 页)
- HUANG X, SHEN N, GUAN X, XU X, KONG F, LIU C, YU D, 2018. Root morphological and structural comparisons of introduced and native aquatic plant species in multiple substrates. *Aquatic Ecology*, 52(1): 65-76.
- HUSSNER A, STIERS I, VERHOFSTAD M, BAKKER E S, GRUTTERS B, HAURY J, ANDERSON L, 2017. Management and control methods of invasive alien freshwater aquatic plants: a review. *Aquatic Botany*, 136: 112-137.
- KADONO Y, 2004. Alien aquatic plants naturalized in Japan: history and present status. *Global Environmental Research*, 8(2): 163-169.
- MACKEY A P, SWARBRICK J T, 1997. The biology of Australian weeds. 32. *Cabomba caroliniana* Gray. *Plant Protection Quarterly*, 12: 154-165.
- MATTHEWS J, BERINGEN R, LAMERS L P M, ODÉ B, POT R, VELDE G, LEUVEN R S, 2013. *Risk analysis of the non-native Fanwort (Cabomba caroliniana) in the Netherlands*. Nijmegen, the Netherlands: Roadboud University.
- MCCRACKEN A, BAINARD J D, MILLER M C, HUSBAND B C, 2013. Pathways of introduction of the invasive aquatic plant, *Cabomba caroliniana*. *Ecology and Evolution*, 3(6): 1427-1439.
- NOËL J C, 2005. *Growth, reproduction and control of an invasive aquatic plant, Cabomba Caroliniana in Kashiabog Lake, Ontario and its potential dispersal*. Peterborough: Trent University.
- ØRGAARD M, 1991. The genus *Cabomba* (Cabombaceae) — A taxonomic study. *Nordic Journal of Botany*, 11(2): 179-203.
- RICE E L, 1979. Allelopathy — An update. *The Botanical Review*, 45(1): 15-109.
- SCHEERS K, DENYS L, JACOBS I, PACKET J, SMEEKENS 部公告 第 1216 号. (2009-06-20) [2019-12-06]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2009/dliuq/201806/t20180607_6151337.htm.
- 周国法, 徐汝梅, 1998. 空间分布型的形成过程研究. 生态学报, 18(5): 516-522.
- 周社文, 谭小平, 成进, 彭晖, 李建河, 杨亚平, 龚磊, 2006. 稻水象甲种群扩散机制及控制对策. 植物检疫, 20(6): 343-344.
- IWAO S, 1968. A new regress method for analyzing the aggregation pattern of animal populations. *Researches on Population Ecology*, 10(1): 1-20.
- TAYLOR L R, 1961. Aggregation, variance and the mean. *Nature*, 189: 732-735.
- (责任编辑:郭莹)
- V, ADRIAENS T, 2019. *Cabomba caroliniana* Gray (Cabombaceae) invades major waterways in Belgium. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 420: 22.
- SCHEERS K, DENYS L, PACKET J, ADRIAENS T, 2016. A second population of *Cabomba caroliniana* Gray (Cabombaceae) in Belgium with options for its eradication. *Bioinvasions Records*, 5: 227-232.
- SCHOOLER S S, 2008. Shade as a management tool for the invasive submerged macrophyte, *Cabomba caroliniana*. *Journal of Aquatic Plant Management*, 46: 168-171.
- SCHOOLER S, JULIEN M, 2006. Effects of depth and season on the population dynamics of *Cabomba caroliniana* in south-east Queensland// Weed Management Society of South Australia. *Proceedings of 15th Australian weed conference*. Adelaide, Australia: 768-771.
- SCHOOLER S, JULIEN M, WALSH G C, 2006. Predicting the response of *Cabomba caroliniana* populations to biological control agent damage. *Australian Journal of Entomology*, 45(4): 327-330.
- WILSON C E, DARBYSHIRE S J, JONES R, 2007. The biology of invasive alien plants in Canada. 7. *Cabomba caroliniana* A. Gray. *Canadian Journal of Plant Science*, 87: 615-638.
- YIN L, LI W, MADSEN T V, MABERLY S C, BOWES G, 2017. Photosynthetic inorganic carbon acquisition in 30 freshwater macrophytes. *Aquatic Botany*, 140: 48-54.
- ZHANG X, ZHONG Y, CHEN J, 2003. Fanwort in eastern China: an invasive aquatic plant and potential ecological consequences. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32(2): 158-160.
- (责任编辑:郭莹)