

施用蝗虫微孢子对草原地上部分天敌群落多样性的影响

星学军¹ 邢永杰² 沈 杰² 李傲梅^{2*}

(1. 青海省草原总站, 西宁 810008; 2. 中国农业大学植物保护学院, 北京 100193)

摘要: 为明确蝗虫微孢子对蝗虫的持续控制, 2015年在青海省开展了蝗虫微孢子防治草原蝗虫的试验和连续跟踪调查。结果表明, 施用蝗虫微孢子前后温性和高寒草原蝗区天敌种类无明显变化, 但部分天敌类群所占比例发生了变化, 施用蝗虫微孢子2、3、4周后, 温性草原中寄生蝇所占比例分别显著增加了330.6%、752.8%、752.8%, 高寒草原中寄生蝇所占比例分别显著增加了108.1%、309.9%、310.8%, 温性草原中芫菁所占比例分别显著下降了43.5%、45.5%、75.5%, 高寒草原中芫菁所占比例分别显著下降了54.2%、77.2%、76.3%。施用蝗虫微孢子2、3和4周后, 温性草原的Shannon指数比防治前分别显著增加了5.7%、7.0%、3.8%, Pielou指数比防治前分别显著增加了6.2%、6.2%、3.7%, Simpson指数比防治前分别显著增加了5.4%、6.8%、4.1%; 施用蝗虫微孢子2周后, 高寒草原的Shannon指数、Pielou指数和Simpson指数比防治前分别显著升高了4.8%、5.4%、3.8%, 施用3周后, 3个天敌群落多样性指数比防治前分别增加了1.8%、1.3%、2.2%, 但Shannon指数和Simpson指数与防治前无显著差异, 而Pielou指数比防治前显著增加, 施用4周后, 3个指数均与防治前无显著差异。施用蝗虫微孢子2、3和4周后, 天敌群落布雷柯蒂斯距离与防治前差异显著, 而重复样区间的布雷柯蒂斯距离在整个调查期无显著变化。表明蝗虫微孢子施用后对不同生态类型草原天敌群落多样性有一定的保护作用。

关键词: 生物防治; 昆虫病原物; 生物多样性; 草原管理

Effects of microsporidia *Paranosema locustae* on the community structure and diversity of aboveground natural enemies of grasshoppers in rangelands

Xing Xuejun¹ Xing Yongjie² Shen Jie² Li Aomei^{2*}

(1. Qinghai Rangeland General Station, Xining 810008, Qinghai Province, China; 2. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: For sustainable control of grasshoppers by microsporidia *Paranosema locustae*, the effects of *P. locustae* on grasshoppers were investigated in Qinghai Province in 2015. The results showed that there was no significant difference in the species of natural enemies in temperate and alpine steppe before and after treatment with *P. locustae*, but the ratios of natural enemies were different. After treating *P. locustae* for two, three, or four weeks, the ratio of the parasitic flies from the temperate steppe increased by 330.6%, 752.8%, 752.8%, and those from the alpine steppe increased by 108.1%, 309.9%, 310.8%, while the ratio of blister beetles from the temperate steppe decreased by 43.5%, 45.5%, 75.5%, and those from the alpine steppe decreased by 54.2%, 77.2%, 76.3%, respectively. The Shannon index of natural enemies increased by 5.7%, 7.0%, 3.8%; the Pielou index increased by 6.2%, 6.2%, 3.7%,

and the Simpson index increased by 5.4%, 6.8%, 4.1% after treating *P. locustae* for two, three, or four weeks in the temperate steppe, respectively. In the alpine steppe, the Shannon, Pielou and Simpson indexes increased by 4.8%, 5.4%, and 3.8%, respectively, two weeks after treatment; the Shannon and Simpson indexes non-significantly increased by 1.8% and 2.2%, respectively, and the Pielou index significantly increased by 1.3% after treatment for three weeks, but the three indexes showed no significant changes post treatment for four weeks. The Bray-Curtis distances of the community of natural enemies showed significant difference after treatment with *P. locustae* for two, three, or four weeks, but within the replicates no significant change was observed. These results suggested that *P. locustae* had no side-effects on the community diversity of natural enemies in the temperate and alpine steppes after treatment with *P. locustae*.

Key words: biocontrol; entomopathogen; biodiversity; rangeland management

我国草原面积超过4亿 hm^2 ,是广大牧民赖以生存的基本资源。近年来草原蝗害发生频繁,给农牧业发展和牧民生活带来较大影响,每年因蝗虫给牧草带来的损失高达30%以上。草原蝗虫为害加剧了草场退化和沙化,严重阻碍了我国北方省区畜牧业的发展(全国畜牧兽医总站,2014)。因此,草地蝗虫防控是我国草原管理中一项非常重要的任务(洪军等,2014)。目前,草原蝗虫防治主要是以广谱化学农药为主,其可以迅速压低虫口密度。但随着人们对保护生态和环境要求的不断提高,蝗虫治理也由化学防治转化为以生物防治为主的综合治理。青藏高原是长江、黄河、澜沧江等重要河流的水源地,其生态环境的保护尤其重要,开展青藏高原草原蝗虫的生物防治,减少化学农药的使用,对于保护水源地的生态十分必要。采用生物防治可大大减少化学农药的污染,保护草原生态系统的生物多样性,提高生态系统的自然抗灾能力(石旺鹏和季荣,2017)。

蝗虫病原微生物是蝗虫生物防治的有效手段,是替代化学农药的重要措施。当前用于草原蝗虫的微生物防治制剂主要包括蝗虫微孢子 *Paranosema locustae* Canning、金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* Sorokin、蝗绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* var. *acridum*、球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill、苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis* (Berliner)等。蝗虫微孢子是第1个也是目前应用面积最大的防蝗生物制剂。蝗虫微孢子是从土蝗 *Melanoplus bivittatus* (Say)体内分离纯化出来、可以侵染100多种直翅目昆虫的单细胞真核病原微生物,其通过感病雌性蝗虫的卵传播给下一代。蝗虫微孢子不污染环境,不杀伤天敌,对人畜安全,不产生对其它生物的二次毒害,有利于保护生物多样性(Lockwood et al., 1999; Stentiford et al., 2016)。Henry

(1972)发现该病的流行与各地区的蝗虫种类组成及丰富度有关,在季节动态中蝗虫感染率的高低与微孢子引起的死亡率有关,也与蝗虫的迁移扩散有关,如虫口密度太低则无法传播流行。美国、加拿大、阿根廷等国利用蝗虫微孢子防治蝗虫的持续效果显著,当年防治效果可达50%~90%以上,存活蝗虫中20%~50%被微孢子病原感染,微孢子病原在南美草原蝗群中至少可以持续流行6~7年(Lange & Az-zaro, 2008; Christian et al., 2012)。国内研究表明,草场引入蝗虫微孢子后有2个明显的发病高峰期,蝗虫高密度利于微孢子虫病的流行(Shi et al., 2009),在内蒙古自治区和青海省草原上施用蝗虫微孢子9年后,微孢子在多种草原蝗虫体内仍有较高寄生率,有效抑制蝗虫种群数量增长(Miao et al., 2012),施用1次,6~10年不需要再施药防治,持续控蝗效果明显(Shi & Njagi, 2004)。

我国20世纪80年代从美国引进蝗虫微孢子,室内研究证明其对主要天敌昆虫没有负面影响,但引进后对我国草原生态系统天敌群落的影响,特别是对其天敌生物多样性的影响尚不明确。本试验选择典型的、比较敏感的草原生态系统——青藏高原上的高寒草原和温性草原进行蝗虫微孢子对地上天敌群落影响的研究。高寒草原试验区寒冷、牧草生长期短、雏蝗为优势种类,而温性草原试验区较温暖、牧草生长期长、蚁蝗是优势种类,这2类试验区被认为是高原草场代表。通过研究和分析蝗虫微孢子施用后2种生态类型草原上主要天敌的种类、数量和组成的变化,重点分析其天敌生物多样性指数的变化,同时采用布雷柯蒂斯距离比较施用蝗虫微孢子前后草原生态系统中天敌群落的差异性和试验区天敌群落的稳定性,初步明确蝗虫微孢子在一定时期内对草原生态系统中天敌群落的影响,也为进一步

了解蝗虫微孢子持续控制蝗害的新机制提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 材料

药剂及仪器: 8×10^9 个/mL 的蝗虫微孢子虫浓缩液制剂, 中国农业大学生物防治资源研究中心提供。XDS-1B 光学显微镜, 重庆光电仪器有限公司; 东方红 AC-18 型超低量喷雾器, 北京市植保机械厂; 3WG-1200A 拖拉机牵引喷雾车, 南通黄海药械有限公司; 自制标准铝合金样框 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 和捕虫网(网径 33~35 cm)。

1.2 方法

1.2.1 田间试验及调查方法

2015 年温性草原选取同德草原($35^{\circ}24' \text{ N}$, $100^{\circ}63' \text{ E}$) 为试验点, 高寒草原选择祁连草原($38^{\circ}21' \text{ N}$, $100^{\circ}22' \text{ E}$) 为试验点, 每个试验点设置 3 个试验区, 每个试验区面积 667 hm^2 , 当蝗虫的第 3 龄盛期时(7 月 25 日) 采用拖拉机牵引喷雾车超低喷施蝗虫微孢子水悬剂, 施用浓度均为 7.5×10^9 个/ hm^2 。条带式喷施, 1 周内喷完。

施药前 1 天调查 1 次蝗虫密度, 施药后第 2、3、4 周各调查 1 次。调查采用随机扫网取样, 从试验区中心开始, 分东、南、西、北、中 5 个方向取样, 每个方向隔 500 m 设置 1 个样点, 共设 25 个取样点, 每个样点往返扫 200 网次, 将网捕样本标记好并装入塑料袋带回室内冷冻贮藏, 分类鉴定并统计天敌和节肢动物等物种种类和数量(Zhang et al., 2015)。

1.2.2 施药后草原主要天敌群落结构的变化

分别统计蝗虫微孢子施用前后试验区主要天敌的种类和数量, 计算主要天敌的所占比例, 分析施药前后主要天敌种类和比例变化情况。

1.2.3 施药后草原群落多样性指数的变化

采用 R 程序包 vegan 功能分析蝗虫微孢子施用前后试验区主要天敌群落的 Shannon 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数, 对主要天敌群落的 Shannon 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数用线性混合模型进行运算, 并对每个取样日期的数据进行差异显著性分析。

1.2.4 天敌种群布雷柯蒂斯距离的计算

运用 R 3.0.3 分析施用蝗虫微孢子前后不同时间点天敌群落的布雷柯蒂斯距离(群落之间的不相似性)。布雷柯蒂斯距离分 2 种运算, 第 1 种为防治前与防治后 2、3、4 周进行比较, 计算它们之间的布雷柯蒂斯距离; 第 2 种运算是每个调查日期的重

复样本进行比较, 在每个取样日期计算同一样本不同重复之间的布雷柯蒂斯距离, 然后以取样次数为横坐标对数据进行线性回归得到标准曲线, 计算斜率、相关性系数和显著性。

1.3 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件进行数据分析, 采用 one-way ANOVA 对数据进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 施用微孢子对草原天敌群落结构的影响

2.1.1 对温性草原试验区天敌群落结构的影响

施用蝗虫微孢子前后在温性草原试验区均采集到相同种类的天敌, 主要包括蚂蚁、蜘蛛、寄生蝇、食虫虻、芫菁、步甲、寄生蜂等, 并发现少数蜥蜴、瓢虫和虎甲等。施药后部分类群在生态系统中的比例发生了明显的变化。与施药前相比, 施药后 2、3 和 4 周寄生蝇的比例分别显著增加了 330.6%、752.8% 和 752.8%, 芫菁的比例分别显著下降了 43.5%、45.5% 和 75.5%, 其它类群变化趋势不明显(表 1)。

2.1.2 对高寒草原试验区天敌群落结构的影响

施用蝗虫微孢子前后在高寒试验区均采集到相同的天敌类群, 主要包括蚂蚁、芫菁、寄生蝇、步甲、寄生蜂、食虫虻等, 同样发现少数蜥蜴、瓢虫和虎甲等天敌。施药后部分类群在生态系统中的比例发生了变化。与施药前相比, 施药后 2、3 和 4 周寄生蝇的比例分别显著增加了 108.1%、309.9%、310.8%, 芫菁的比例分别显著下降了 54.2%、77.2%、76.3%, 其它类群变化趋势不明显(表 1)。

2.2 施用微孢子对草原天敌群落多样性的影响

2.2.1 对温性草原试验区天敌群落多样性的影响

施用蝗虫微孢子后 2、3、4 周, 温性草原试验区主要天敌群落的 Shannon 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数比防治前升高且差异极显著($F=54.07$, $P<0.001$; $F=54.07$, $P<0.001$; $F=25.20$, $P<0.001$)。施用蝗虫微孢子后 2、3 和 4 周, 主要天敌群落的 Shannon 指数比防治前分别增加了 5.7%、7.0%、3.8%, Pielou 指数比防治前分别增加了 6.2%、6.2%、3.7%, Simpson 指数分别比防治前增加了 5.4%、6.8%、4.1%(表 2)。表明蝗虫微孢子对温性草原生态系统天敌多样性有明显的保护作用。

2.2.2 对高寒草原试验区天敌群落多样性的影响

施用蝗虫微孢子 2 周后, 高寒草原试验区主要天敌群落的 Shannon 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数较防治前升高且差异极显著($F_{3,8}=22.34$, $P<0.001$;

$F_{3,8}=22.35, P<0.001; F_{3,8}=22.17, P<0.001$), 其分别增加了4.8%、5.4%和3.8%。施用蝗虫微孢子3周后, 高寒草原试验区主要天敌群落的 Shannon 指数和 Simpson 指数比防治前分别增加了1.8%和1.3%, 但

两者差异不显著, 而 Pielou 指数比防治前显著增加2.2% ($P<0.05$)。施用蝗虫微孢子4周后, 主要天敌群落的 Shannon 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数与防治前无显著差异(表2)。

表1 施用蝗虫微孢子前后温性草原和高寒草原试验区主要天敌的比例变化
Table 1 Ratios of main natural enemies post treatment in temperate and alpine steppes before and after treatment with *Paranosema locustae*

处理后的时间(周) Time after treatment (week)	温性草原 Temperate steppe (%)						
	蚂蚁 Ant	寄生蜂 Wasp	步甲 Carabid	芫菁 Blister	寄生蝇 Fly	食虫虻 Rubber fly	蜘蛛 Spider
0	23.6±3.1 c	1.8±0.6 b	7.2±1.2 b	20.0±4.2 a	3.6±1.1 c	5.5±1.2 a	38.2±3.1 a
2	33.8±4.8 a	1.4±0.2 b	9.9±1.7 a	11.3±2.6 b	15.5±3.2 b	1.4±0.7 c	26.7±3.2 b
3	19.8±4.3 cd	1.9±0.1 b	9.9±1.9 a	10.9±3.1 b	30.7±5.1 a	1.9±0.6 b	24.8±2.7 bc
4	29.4±3.3 b	5.5±1.1 a	6.3±1.3 bc	4.9±2.1 c	30.7±4.9 a	2.1±0.7 b	21.6±2.3 c
处理后的时间(周) Time after treatment (week)	高寒草原 Alpine steppe (%)						
	蚂蚁 Ant	寄生蜂 Wasp	步甲 Carabid	芫菁 Blister	寄生蝇 Fly	食虫虻 Rubber fly	
0	22.2±3.2 b	11.1±2.3 b	11.1±2.7 b	33.4±4.7 a	11.1±2.7 c		11.1±1.6 a
2	38.5±3.7 a	7.7±1.7 cd	15.4±2.3 a	15.3±1.9 b	23.1±2.4 b		0.0±0.0 d
3	25.3±4.1 b	5.1±1.2 d	13.9±3.6 ab	7.6±1.3 c	45.5±5.1 a		2.5±0.6 c
4	10.5±2.3 c	24.5±3.7 a	6.1±1.4 c	7.9±1.6 c	45.6±3.8 a		5.3±1.1 b

表中数据为平均数±标准误。同列不同字母表示经 one-way ANOVA 检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by one-way ANOVA.

表2 施用蝗虫微孢子前后温性草原和高寒草原试验区天敌群落多样性指数的变化
Table 2 Biodiversity changes of natural enemy community before and after treatment with *Paranosema locustae* in temperate and alpine steppes

处理后的时间(周) Time after treatment (week)	温性草原 Temperate steppe			高寒草原 Alpine steppe		
	Shannon 指数 Shannon index	Pielou 指数 Pielou index	Simpson 指数 Simpson index	Shannon 指数 Shannon index	Pielou 指数 Pielou index	Simpson 指数 Simpson index
0	1.568±0.009 c	0.806±0.005 c	0.745±0.007 c	1.673±0.009 b	0.934±0.005 c	0.789±0.004 b
2	1.664±0.001 a	0.855±0.001 a	0.780±0.001 a	1.747±0.003 a	0.975±0.002 a	0.819±0.001 a
3	1.677±0.009 a	0.862±0.004 a	0.789±0.003 ab	1.704±0.003 ab	0.951±0.002 b	0.800±0.001 b
4	1.626±0.002 b	0.836±0.001 b	0.769±0.001 b	1.682±0.009 ab	0.939±0.005 bc	0.790±0.004 b

表中数据为平均数±标准误。同列不同字母表示经 one-way ANOVA 检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by one-way ANOVA.

2.3 施药对草原天敌群落布雷柯蒂斯距离的影响

施用蝗虫微孢子前后温性草原试验区主要天敌群落的布雷柯蒂斯距离差异极显著 ($F=158.32, P<0.001$), 且施用蝗虫微孢子后第3周和第4周温性草原试验区主要天敌群落的布雷柯蒂斯距离比第2周分别增加了39.0%和117.4%, 温性草原试验区天敌多样性随时间延长增加显著 ($P<0.05$, 图1-A)。施用后不同时期重复样区间的布雷柯蒂斯距离在整个调查期无显著变化 ($F=3.071, P=0.091$, 图2-A)。

施用蝗虫微孢子前后高寒草原试验区天敌群落的布雷柯蒂斯距离差异极显著 ($F=954.59, P<0.001$), 且施用蝗虫微孢子后第3周和第4周的高寒草原试验区主要天敌群落的布雷柯蒂斯距离比第2周分别增加了29.8%和54.3%, 高寒草原试验区天敌多样性随时间延长也显著升高 ($P<0.05$, 图1-B)。施药后不同时期重复样区间天敌群落的布雷柯蒂斯距离在整个调查期无显著变化 ($F=3.95, P=0.053$) (图2-B)。

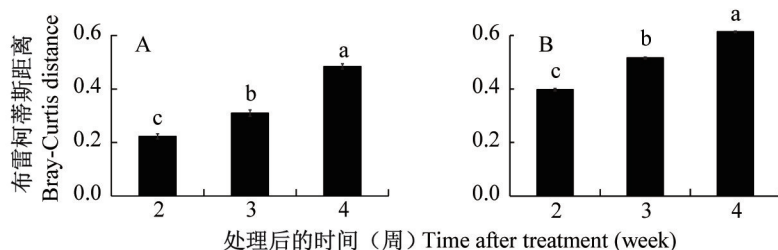


图1 施用蝗虫微孢子后温性草原(A)和高寒草原(B)试验区天敌群落布雷柯蒂斯距离的变化

Fig. 1 Changes of Bray-Curtis distance of natural enemy community after treatment in temperate (A) and alpine (B) steppes

图中数据为平均数±标准误。不同字母表示经 one-way ANOVA 检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level by one-way ANOVA.

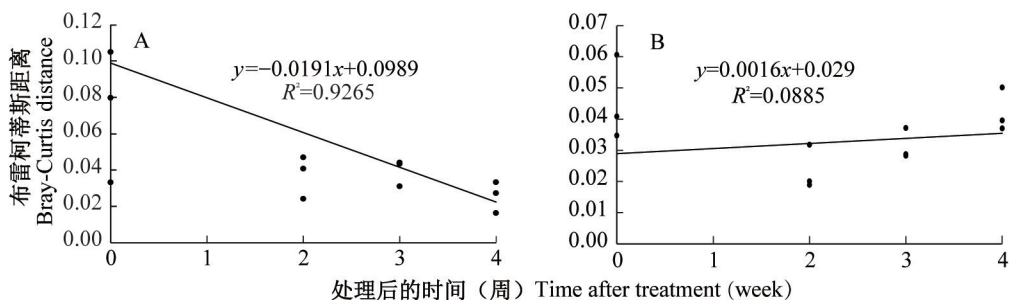


图2 施用蝗虫微孢子后温性草原(A)和高寒草原(B)试验区重复样区天敌群落布雷柯蒂斯距离的变化

Fig. 2 Changes of Bray-Curtis distance of natural enemy community from replicates region after treatment in temperate (A) and alpine (B) steppes

3 讨论

生物防治就是利用生物活体及其代谢产物来防治有害生物,生物防治的优势在于生物制剂对非靶标生物没有直接危害并能持续保持对害虫的防控效果(尹新民,2016)。蝗虫微孢子是专性寄生蝗虫等直翅目害虫的有益生物,被证明对非靶标生物无直接危害并具有持续防控作用(Miao et al., 2012),一方面,蝗虫微孢子病能在蝗群中持续流行较长时间,将蝗虫密度持续控制在经济危害水平以下;另一方面,蝗虫微孢子对主要天敌的生长发育没有明显的负面影响,而蝗虫感染了微孢子病后,行动迟缓,更容易被天敌捕食,有利于蝗虫天敌种群数量的稳定,提高了其对蝗害的自然控制作用(Street, 1987; Soltner et al., 2005; Shi et al., 2014)。本研究结果也证明了在田间试验条件下,施用蝗虫微孢子后草原生态系统中地上主要天敌的种类没有变化,但是部分天敌类群的比例变化明显,如寄生蝇的比例有升高的趋势,这可能与寄生蝇喜欢寄生成虫的生物学特性有关,因为后期主要以成蝗为主;而食虫虻和蜘蛛等部分捕食性天敌的比例有下降的趋势,这也可能与蝗虫成虫比例上升不易被捕食等有关。

广谱化学农药对草原生态系统的生物多样性是

致命的,特别是对天敌生物,如有机磷类等杀蝗药剂可以迅速杀死、杀伤甚至杀灭蝗虫的天敌生物,特别是对芫菁、步甲、蜥蜴等有严重的杀伤作用(Lockwood et al., 1999; 包善微等, 2011; Guo et al., 2012)。高原草地生态系统物种种类相对匮乏,属于少稀有种、多常见种、优势种明显的群落,破坏后的生态平衡恢复相当缓慢,特别是在面积较大的情况下,外部迁移的过程都很漫长(Armitage et al., 2012; 阿米娜·热杰普, 2016)。本试验发现,施用蝗虫微孢子后草原生态系统中天敌群落多样性指数明显升高,证明了Plischuk et al. (2013)和 Stentiford et al. (2016)关于蝗虫感染了微孢子病后,行动迟缓,容易被天敌捕食,有利于蝗虫天敌种群数量稳定的结论。本试验还发现,施用蝗虫微孢子前后布雷柯蒂斯距离差异极显著且天敌多样性随时间延长而明显升高,进一步证明了蝗虫微孢子对草原生态系统天敌群落的保护作用,而施用后不同时期重复样区间天敌群落的布雷柯蒂斯距离在整个调查期无显著变化,说明了重复试验区内蝗虫微孢子对天敌群落的作用是稳定的。

高原草地生态系统是一个脆弱的生态系统,蝗虫是优势类群,蝗虫微孢子可以有效杀死蝗虫并在蝗群中流行,其对该生态系统生物多样性的长期影

响还不明确,需要进一步跟踪,本试验只明确了蝗虫微孢子对地表天敌群落的影响,其对地下及鸟类等有益生物的影响需进一步研究。本试验结果为明确蝗虫微孢子一定时间内对天敌保护的积极作用及理解其持续控害的新机制提供依据,对科学利用蝗虫微孢子并提升其对蝗虫的可持续治理有一定意义。

参 考 文 献 (References)

- Amina R. 2016. Current situation of grassland ecological restoration and improvement measures. *Animal Health*, (4): 18 (in Chinese) [阿米娜·热杰普. 2016. 草原生态恢复现状及改进措施. 兽医导刊, (4): 18]
- Armitage HF, Britton AJ, van der Wal R, Woodin SJ. 2012. Grazing exclusion and phosphorus addition as potential local management options for the restoration of alpine moss-sedge heath. *Biological Conservation*, 153: 17–24
- Bao SW, Liu F, Dai HJ, Ding X, Wu XB, Yuan XH, Gu QH. 2011. Effect of sublethal doses of chemical pesticide on natural enemy of insect. *China Plant Protection*, 31(12): 10, 15–18 (in Chinese) [包善微, 刘芳, 戴红君, 丁旭, 吴小兵, 袁小华, 顾庆红. 2011. 化学农药亚致死剂量对天敌昆虫的影响. 中国植保导刊, 31(12): 10, 15–18]
- Chen GW, Dong ZM, Yuwen YQ. 2005. Production and application of *Nosema locustae* in the field. *Bulletin of Biology*, 40(5): 44–47 (in Chinese) [陈广文, 董自梅, 宇文延清. 2005. 蝗虫微孢子虫的生产及田间应用现状. 生物学通报, 40(5): 44–47]
- Christian B, Yanina M, Santiago P, Carlos E L. 2012. Status of the alien pathogen *Paranosema locustae* (Microsporidia) in grasshoppers (Orthoptera: Acridoidea) of the Argentine Pampas. *Biocontrol Science & Technology*, 22(5): 497–512
- Guo YY, Zhao A, Shi WP. 2012. Control of grasshoppers by combined application of *Paranosema locustae* and an insect growth regulator (Cascade) in rangelands in China. *Journal of Economic Entomology*, 105(6): 1915–1920
- Henry JE. 1972. Epizootiology of infection by *Nosema locustae* Canning (Microsporidia: Nosematidae) in grasshoppers. *Acrida*, 1: 111–120
- Hong J, Du GL, Wang GJ. 2014. The occurring and control situation of grasshopper in the grassland of China (Review). *Acta Agrestia Sinica*, 22(5): 929–934 (in Chinese) [洪军, 杜桂林, 王广君. 2014. 我国草原蝗虫发生与防治现状分析. 草地学报, 22(5): 929–934]
- Husbandry and Veterinary Station of China. 2014. Practices and application of biological control of grasshopper in rangeland of China. Beijing: China Agriculture Press, pp. 66–108 (in Chinese) [全国畜牧兽医总站. 2014. 中国草原蝗虫生物防治实践与应用. 北京: 中国农业出版社, pp. 66–108]
- Lange CE, Azzaro FG. 2008. New case of long-term persistence of *Paranosema locustae* (Microsporidia) in melanopline grasshoppers (Orthoptera: Acrididae: Melanoplinae) of Argentina. *Journal of Invertebrate Pathology*, 99: 357–359
- Lockwood JA, Bomer CR, Ewen AB. 1999. The history of biological control with *Nosema locustae*: lessons for locust management. *Insect Science and Its Application*, 19(4): 333–350
- Miao J, Guo YY, Shi WP. 2012. The persistence of *Paranosema locustae* after application in Qinghai Plateau, China. *Biocontrol Science & Technology*, 22(6): 733–735
- Plischuk S, Bradi CJ, Lange CE. 2013. Spore loads of *Paranosema locustae* (Microsporidia) in heavily infected grasshoppers (Orthoptera: Acridoidea) of the Argentine Pampas and Patagonia. *Journal of Invertebrate Pathology*, 114(1): 89–91
- Shi WP, Guo Y, Xu C, Tan SQ, Miao J, Feng YJ, Zhao H, St. Leger RJ, Fang W. 2014. Unveiling the mechanism by which microsporidian parasites prevent locust's swarm behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(4): 1343–1348
- Shi WP, Ji R. 2017. Research and application of entomopathogenic microsporidium. *Chinese Journal of Biological Control*, 33(1): 11–17 (in Chinese) [石旺鹏, 季荣. 2017. 昆虫病原微孢子研究与应用. 中国生物防治学报, 33(1): 11–17]
- Shi WP, Njagi PGN. 2004. Disruption of aggregation behaviour of oriental migratory locusts (*Locusta migratoria manilensis*) infected with *Nosema locustae*. *Journal of Applied Entomology*, 128(6): 414–418
- Shi WP, Wang YY, Lü F, Guo C, Cheng X. 2009. Persistence of *Paranosema (Nosema) locustae* (Microsporidia: Nosematidae) among grasshopper (Orthoptera: Acrididae) populations in the Inner Mongolia Rangeland, China. *Biocontrol*, 54(1): 77–84
- Solter LF, Maddox JV, Vossbrink CR. 2005. Physiological host specificity: a model using the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* (Hübner) (Lepidoptera: Crambidae) and microsporidia of row crop and other stalk-boring hosts. *Journal of Invertebrate Pathology*, 90(2): 127–130
- Stentiford GD, Becnel JJ, Weiss LM, Keeling PJ, Didier ES, Williams BAP, Bjornson S, Kent ML, Freeman MA, Brown MJF, et al. 2016. Microsporidia-emergent pathogens in the global food chain. *Trends in Parasitology*, 32(4): 336–348
- Street DA. 1987. Future prospects for microbial control of grasshoppers.//Capinera JL. Integrated pest management on rangeland: a short grass prairie perspective. Boulder, CO: Westview Press, pp. 205–218
- Yin XM. 2016. Insecticidal biology. Beijing: China Agriculture Press, pp. 1–5 (in Chinese) [尹新民. 2016. 杀虫生物学. 北京: 中国农业出版社, pp. 1–5]
- Zhang K, Xing X, Tan S, Hou X, Chen H, Liu P, Ge Y, Shi W. 2015. Population dynamics and infection prevalence of grasshopper (Orthoptera: Acrididae) after application of *Paranosema locustae* (Microsporidia). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 25(1): 33–38

(责任编辑:张俊芳)