

青海省门源草原毛虫取食特性及其防控经济阈值

房文娇^{1,2} 李 霜³ 王思宇⁴ 成 利⁵ 王 成⁴ 陈秀娟⁵ 石浩玉⁴
冯欣澳^{1,2} 涂雄兵^{2,6} 冯士骞² 常 静⁴ 任金龙^{1*} 王广君^{2,6*}

(1. 新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193; 3. 重庆市农业科学院, 重庆 400000; 4. 内蒙古农业大学园艺与植物保护学院, 呼和浩特 010000; 5. 海晏牧场, 青海海晏县 812200; 6. 中国农业科学院植物保护研究所, 农业农村部锡林郭勒草原有害生物科学观测实验站, 锡林浩特 026000)

摘要: 为明确青海省门源草原毛虫 *Gynaephora menyuanensis* 的取食特性及其防控经济阈值, 在室内条件下观察门源草原毛虫对 8 种植物的取食偏好及其取食能力; 并按照不同虫口密度进行室外笼罩试验, 测定不同虫口密度下门源草原毛虫造成的牧草产量损失以及不同生物药剂对门源草原毛虫的防治效果, 并根据当年牧草价格、产量水平及防治费用等计算门源草原毛虫的经济阈值。结果表明: 在供试的 8 种植物中, 门源草原毛虫较喜食针茅 *Stipa capillata* 和垂穗披碱草 *Elymus nutans*, 相对取食频数分别为 0.33 和 0.26; 4 龄幼虫日取食量最高, 为 40.67 mg/d, 5 龄幼虫对针茅的利用率为 6.61% 和转化率为 93.94%。将门源草原毛虫虫口密度 x 与牧草产量损失率 y 进行回归模型拟合结果显示, 线性函数 $y=0.051x+0.083$ ($R^2=0.940$) 的拟合最好。田间防治结果表明, 施药 10 d 后, 球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 与金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 混合施用对门源草原毛虫的防治效果最高, 为 98.92%; 其次为金龟子绿僵菌单独施用, 防治效果达 97.33%。仅用苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis* Ps3 防治门源草原毛虫时的经济阈值为 49.35~57.00 头/ m^2 , 仅用金龟子绿僵菌防治时的经济阈值为 45.43 头/ m^2 , 仅用球孢白僵菌防治草原毛虫时经济阈值为 54.25 头/ m^2 , 金龟子绿僵菌与球孢白僵菌混合施用防治时的经济阈值为 90.92 头/ m^2 。门源草原毛虫 3 龄幼虫取食量最小, 根据使用药剂造成防治成本及防治效果产生差异性, 建议在门源草原毛虫 3 龄前使用金龟子绿僵菌进行田间防治。

关键词: 门源草原毛虫; 取食能力; 产量损失; 防治效果; 经济阈值

Studies on feeding characteristics of grassland caterpillar *Gynaephora menyuanensis* and its economic threshold for control in Qinghai

Fang Wenjiao^{1,2} Li Shuang³ Wang Siyu⁴ Cheng Li⁵ Wang Cheng⁴ Chen Xiujuan⁵ Shi Haoyu⁴

Feng Xin'ao^{1,2} Tu Xiongbing^{2,6} Feng Shiqian² Chang Jing⁴ Ren Jinlong^{1*} Wang Guangjun^{2,6*}

(1. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;

2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 400000, China;

4. College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010000, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 5. Haiyan Ranch, Haiyan County 812200, Qinghai Province, China; 6. Scientific Observing and Experimental Station of Pests in Xilingol Rangeland, Ministry of Agriculture, Institute of Plant Protection,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xilingol 026000, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In order to elucidate the feeding habits of grassland caterpillar *Gynaephora menyuanensis* in

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1401104)

*通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: rjlinsect@163.com, wangguangjun@caas.cn

收稿日期: 2024-09-02

Qinghai and establish its economic threshold for prevention and control, the *G. menyuanensis* feeding preferences and its feeding ability on eight plant species were observed under indoor conditions. Cages enveloping tests were conducted using different population densities, and the control effects of different biological agents against *G. menyuanensis* were also analyzed. We calculated the economic threshold of *G. menyuanensis* by considering factors such as the price of pasture, level of yield, and prevention cost, providing theoretical basis for the prevention and control of *G. menyuanensis*. The results showed that among the eight selected plant species, *G. menyuanensis* preferred for needle fescue *Stipa capillata* and pendulous lancelet *Elymus nutans*, with relative feeding frequencies of 0.33 and 0.26, respectively. The highest daily feeding amount (40.67 mg/d) was recorded for the 4th instar larvae, and the 5th instar larvae showed the highest utilization and conversion rates on needle fescue, at 6.61% and 93.94%, respectively. A regression model relating density (x) and forage yield loss (y) yielded the linear function $y=0.051x+0.083$ ($R^2=0.940$), which was the best fit. The results of field control showed that, 10 d post-application, a mixed treatment of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* achieved the highest control effect at 98.92%, followed by the application of *M. anisopliae* alone at 97.33%. The economic thresholds for the control of *G. menyuanensis* were 49.35–57.00 individuals/m² for *Bacillus thuringiensis* Ps3 alone, 45.43 individuals/m² for *B. thuringiensis* alone, 54.25 individuals/m² for *C. albicans*, and 90.92 individuals/m² for a mixed treatment of *M. anisopliae* and *B. bassiana*. Since the 3rd instar larvae had the lowest feeding rates, considering the cost of control and control effect, it is recommended to apply *M. anisopliae* for field control before the larvae reach the 3rd instar.

Key words: *Gynaephora menyuanensis*; feeding capacity; production loss; control effect; economic threshold

草原毛虫属 *Gynaephora* 害虫对牧草的取食往往导致草地植被破坏并引发大规模草地退化及植物演替,其蜕皮、茧壳还会引发家畜不同类型的口膜炎,造成溃疡、断舌等,甚至导致家畜死亡(尼玛等,2011),是青藏高原畜牧业健康发展的重大阻碍。调查显示,近年来青海省草原毛虫的发生面积和为害程度呈逐年上升趋势,对青海省畜牧业和草地生态系统的影响也越发严重(王海贞和刘昕,2022)。门源草原毛虫 *Gynaephora menyuanensis* 隶属于草原毛虫属,是青藏高原高寒草甸发生最严重的害虫之一(南彦斌等,2023),该草原毛虫的取食范围广泛,主要对禾本科、莎草科、蔷薇科和豆科植物等具有偏好性(严林等,1995a,b)。但关于门源草原毛虫的食性研究报道较少,其食性结构是否发生改变有待进一步研究。

害虫的经济允许损害水平及其对作物生产的影响是当今害虫管理中最常被关注的问题之一,经济允许损害水平是大多数害虫综合管理项目的决策基础,是植物对害虫种群可以忍受的水平(El-Wakeil, 2010)。有害生物综合治理中关键点是确定害虫的经济阈值(Stern et al., 1959),经济阈值是指为防止

正在增长的害虫种群密度达经济允许损害水平时,应采取防治措施的害虫密度,是害虫综合治理的重要基础(程家安等,1986;于洪春等,2021)。经济阈值是一个动态指标,常随着地区、牧草价格、防治成本以及作物产量水平等变化而变化(张海厚等,2000)。陈培育等(2022)研究发现河南省南阳市夏玉米苗期、喇叭口期和吐丝期的草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 经济阈值分别为 222~399、151~317 和 81~262 头/百株;刘彦龙等(2021)研究发现海南省草地贪夜蛾对玉米苗期(4~6 叶)、喇叭口期(8~10 叶)和抽穗期(12~14 叶)各阶段的经济阈值分别为 6~8、12~20 和 19~24 头/20 株,以上研究结果均可为当地草地贪夜蛾的精准防治及合理的农药减量提供依据。基于降低防治成本的原则,制订害虫经济阈值,可为害虫合理防治、有效控制提供决策依据。

高山草原是我国最重要的草原类型之一,其中 48% 以上分布在青藏高原,草原毛虫是青藏高原草原的主要害虫,是草原退化的主要驱动力之一,对草原的承载能力和畜牧业构成了巨大威胁(Lv et al., 2023)。目前,关于草原毛虫的经济阈值多结合前人工作经验,而无明确的经济阈值。本研究以门源草

原毛虫为研究对象,通过室内饲喂法了解其对8种不同寄主植物的选择性、适应性及各个时期对牧草的取食能力,确定合适的防治时期;通过田间笼罩试验研究其幼虫虫口密度与牧草产量损失的关系并确定其经济阈值,在允许造成的经济损失范围内,筛选出低毒、高效药剂,以期为草原毛虫的精准防控和农药减施提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源:门源草原毛虫3龄幼虫采集自青海省海晏牧场,放入底部直径为12.50 cm的一次性餐盒中,底部铺设一次性滤纸保湿,在室温下用海晏牧场采集的新鲜针茅 *Stipa capillata* 饲养24 h,备用。

供试牧草:从海晏牧场采集新鲜垂穗披碱草 *Elymus nutans*、针茅、紫羊茅 *Festuca rubra*、无芒雀麦 *Bromus inermis*、叉分蓼 *Polygonum divaricatum*、肉果草 *Lancea tibetica*、秦艽 *Gentiana macrophylla* 和凤毛菊 *Saussurea japonica* 备用。

药剂及仪器:32 000 IU/mg 苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis* Ps3、32 000 IU/mg 苏云金芽孢杆菌 G033A,武汉科诺生物科技有限公司;10¹⁰个/g 球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*、10¹⁰个/g 金龟子绿僵菌 *Metarrhizium anisopliae*,宁夏中微泰克生物技术有限责任公司。SN-TF2003 精密天平,玖蓝科学仪器商城;一次性餐盒均购买于当地市场。

1.2 方法

1.2.1 门源草原毛虫取食选择性

根据门源草原毛虫栖息生境,选取垂穗披碱草、针茅、紫羊茅、无芒雀麦、叉分蓼、肉果草、秦艽、凤毛菊作为供试牧草,各称取1 g 放入底部直径23 cm、深11.6 cm 的一次性餐盒中,每个餐盒放8种牧草,每种牧草用硫酸纸隔开,在餐盒中心接饥饿4 h以上的门源草原毛虫3龄幼虫10头,每40 min 观察1次试虫取食频次,每次连续观察1 min。试验6次重复,计算毛虫的相对取食频数(李鸿昌等,1983),频数是每次试验观测值的累计数,计算重复试验的平均值,可以看出门源草原毛虫对每种植物的取食次数的分配状况。相对取食频数= $\frac{X}{\sum_{i=1}^n X}$,式中X为试虫

对某一种植物的全部取食次数,n为供试植物种类。当相对取食频数>0.5,为嗜食(++);0.25≤相对取食频数≤0.5,为喜食(++);相对取食频数<0.25,为少食(+) ;0.003<相对取食频数<0.025,为偶食(-);0≤相对取食频数≤0.003,为不取食(--)。

1.2.2 门源草原毛虫取食能力测定

基于1.2.1的结果选取门源草原毛虫取食偏好性最佳的供试植物,取1 g 新鲜植物叶片放入饲养盒中,按照5、7、9、11头/盒的虫口密度将饥饿4 h以上的3龄幼虫放入底部直径12.50 cm、深10 cm的饲养盒中于室内条件下进行饲养,每个密度处理5次重复。每饲喂24 h,收集粪便和剩余叶片,于80 °C下干燥至恒重,分别称量其质量,并采用直径9 cm一次性培养皿称量门源草原毛虫幼虫体重。每24 h 更换1次植物叶片。分别计算门源草原毛虫不同龄期幼虫的消化率、食物利用率、食物转化率(孔唯维等,2024)。取食量=添加食物质量-取食后剩余食物质量,消化率=(取食量-排泄量)/取食量×100%;食物利用率=体重增加量/取食量×100%,体重增加量=后1 d 体重-前1 d 体重;食物转化率=体重增加量/(取食量-排泄量)×100%。

1.2.3 不同虫口密度下牧草产量损失测定

基于1.2.1的结果选取供试植物针茅测定不同虫口密度下的牧草产量损失。于海晏牧场选取针茅长势一致的牧草场地,试验设6个处理,在棱长为1 m 正方体的笼罩内分别接入门源草原毛虫3龄幼虫5、10、20、40、60和80头,以不接虫作为对照。每个处理重复5次,每个笼罩间隔1 m,笼罩按照随机区组排列。每天检测笼罩内门源草原毛虫的数量,如果有自然死亡,则进行补充。幼虫结茧后,将试验小区牧草齐地面收割,在80 °C下烘干至恒重,获得牧草干重,分别计算牧草产量及产量损失率。牧草产量测定时以667 m²为单位作为1个样区,随机抽取10个大小为1 m×1 m的样点,计算出牧草产量的平均值,产量损失率=(对照区牧草产量-门源草原毛虫为害后牧草产量)/对照区牧草产量×100%。采用SPSS 26软件根据产量测定结果对门源草原毛虫虫口密度x与不同虫口密度下牧草产量y进行线性函数、指数函数、复合函数、幂函数、对数函数拟合与回归分析。

1.2.4 不同微生物制剂对草原毛虫的防治效果测定

本试验于2023年7月份在青海省海晏县进行,试验面积共计500.25 hm²,采用喷雾法进行喷施,共设计9个处理,(1)单独施用苏云金芽孢杆菌Ps3,剂量分别为2 250、3 000 g/hm²,喷施面积均为33.35 hm²;(2)单独施用苏云金芽孢杆菌G033A,剂量分别为2 250、3 000 g/hm²,喷施面积均为33.35 hm²;(3)单独施用金

龟子绿僵菌,剂量为750 g/hm²,喷施面积为66.7 hm²; (4)单独施用球孢白僵菌,剂量为750 g/hm²,喷施面积为66.7 hm²; (5)剂量为750 g/hm²的金龟子绿僵菌与750 g/hm²的球孢白僵菌按1:1质量比混配,喷施面积为66.7 hm²; (6)剂量为2 250 g/hm²的苏云金芽孢杆菌Ps3与750 g/hm²的金龟子绿僵菌按3:1质量比混配,喷施面积为66.7 hm²; (7)剂量为2 250 g/hm²苏云金芽孢杆菌Ps3与750 g/hm²球孢白僵菌按3:1质量比混配,喷施面积为66.7 hm²。以不施药处理为对照。

采用五点取样法,每个处理区选取5个10 m×10 m大小的样地,从每样地中选取5个大小为1 m×1 m样点,分别在施药前0 d和施药后的3、5、7和10 d调查虫口密度,计算虫口减退率、防治效果及防治成本。虫口减退率=(处理区药前虫口数-处理区药后虫口数)/处理区药前虫口数×100%,防治效果=(处理区药前虫口数-处理区药后虫口数)/(1-处理区药前虫口数)×100%,防治成本=生物药剂成本+人工成本+机械成本,其中生物药剂成本由药剂公司提供,人工成本和机械成本为试验实际花费。

1.2.5 门源草原毛虫经济阈值计算

经济阈值是指边际产值函数(产量损失率与草原毛虫虫口密度关系基本函数)等于边际控制代

价(经济允许损害水平)时的种群密度。根据1.2.3中的模型拟合结果,最终选择拟合度最高函数模型计算草原毛虫的防治经济阈值。经济允许损害水平=防治成本×效益校正系数/(牧草价格×单位面积产量×防治效果)×100%,效益校正系数=2(从经济、生态和社会效益综合考虑,以高于防治费用的1倍为原则,一般认为收益是支出2倍为宜)。

1.3 数据分析

试验数据利用Excel 2021和SPSS 26软件进行统计分析,采用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 门源草原毛虫取食能力及取食喜好

门源草原毛虫3龄幼虫对所检测的8种植物嗜食程度从大到小依次为针茅>垂穗披碱草>紫羊茅>无芒雀麦>叉分蓼>秦艽>肉果草=凤毛菊(表1)。3龄幼虫对不同寄主植物的相对取食频数存在显著差异($F=77.57, P<0.05$),其喜食针茅和垂穗披碱草,相对取食频数显著高于对其他植物的相对取食频数,分别为0.33和0.26;其次是紫羊茅,相对取食频数为0.16(表1),选取针茅进行门源草原毛虫取食能力试验。

表1 门源草原毛虫对8种供试植物的食性选择

Table 1 The dietary selectivity of *Gynaephora menyuanensis* on eight tested plant species

| 指标 Index | 秦艽 <i>Gentianae macrophyllae</i> | 紫羊茅 <i>Festuca rubra</i> | 肉果草 <i>Lancea tibetica</i> | 叉分蓼 <i>Polygonum divaricatum</i> | 凤毛菊 <i>Saussurea japonica</i> | 无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i> | 垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i> | 针茅 <i>Stipa capillata</i> |
|---|---|---------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 取食频数 Feeding frequency | 11.83 | 43.50 | 8.67 | 914.50 | 8.67 | 25.00 | 71.33 | 92.00 |
| 相对取食频数 Relative feeding frequency | 0.04±0.01 de | 0.16±0.02 c | 0.03±0.01 e | 0.05±0.01 de | 0.03±0.01 e | 0.09±0.01 d | 0.26±0.03 b | 0.33±0.03 a |
| 嗜食等级 Preference level | + | + | + | + | + | + | ++ | ++ |

+: 少食; ++: 喜食。表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P<0.05$)。+: Eat less; ++: phagophilya. Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same row indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$).

2.2 门源草原毛虫的取食能力

门源草原毛虫不同龄期幼虫对针茅取食能力存在显著差异(表2)。4龄和6龄幼虫的取食量较高,分别为40.67 mg/d和37.92 mg/d;5龄幼虫的食物利用率及食物转化率较高,分别为6.61%和93.94%,且食物转化率显著高于其他龄期的食物转化效率;4龄幼虫的食物消化率最高,为11.09%,显著高于其

他龄期(表2)。

2.3 门源草原毛虫对牧草产量损失的影响

门源草原毛虫幼虫结茧后,在80 °C下烘干至恒重,获得牧草干重后计算产量损失率(表3),结果发现,虫口密度为10头/m²产量损失率最低,为14.66%,随着虫口密度的增加产量损失率逐渐增大,当虫口密度达80头/m²时,产量损失率最高,为

39.37% (表3)。

表2 门源草原毛虫不同龄期幼虫对寄主植物取食参数

Table 2 Feeding parameters of different larval instars of *Gynaephora menyuanensis* on host plants

| 虫龄 Larval instar | 取食量 Food consumption/(mg/d) | 食物消化率 Food digestibility/% | 食物利用率 Food utility rate/% | 食物转化率 Food conversion efficiency/% |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 3龄 3rd instar | 24.27±0.01 b | 8.91±0.56 b | 1.06±0.14 b | 1.94±0.17 b |
| 4龄 4th instar | 40.67±0.16 a | 11.09±0.21 a | 5.73±1.86 ab | 28.53±7.06 b |
| 5龄 5th instar | 30.00±0.16 b | 3.24±0.50 c | 6.61±2.39 a | 93.94±13.78 a |
| 6龄 6th instar | 37.92±0.03 a | 7.62±0.39 b | 4.12±1.10 ab | 12.26±7.16 b |

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$)。

表3 门源草原毛虫不同虫口密度对牧草产量的影响

Table 3 Effects of different population densities of *Gynaephora menyuanensis* on forage yield

| 虫口密度/(头/m ²) Population density/ (individuals/m ²) | 产量 Output/(g/m ²) | 产量损失率 Loss rate of production/% |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 449.00±147.28 a | 0.00±0.00 b |
| 5 | 350.00±55.90 ab | 16.93±9.82 ab |
| 10 | 355.00±41.07 ab | 14.66±10.81 ab |
| 20 | 325.00±48.73 ab | 22.25±5.81 ab |
| 40 | 303.00±35.63 b | 28.42±8.17 ab |
| 60 | 285.00±119.37 b | 34.12±12.74 a |
| 80 | 255.00±255.00 b | 39.37±9.73 a |

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$)。

将虫口密度 x 与牧草产量损失率 y 之间进行曲线拟合分析, 曲线拟合结果显示, 回归方程 R^2 均在 0.786 以上, P 均小于 0.05, 5 种回归模型 R^2 值由高到低依次为线性函数>指数函数>复合函数>幂函数>对数函数, 进一步结合 F 检验结果发现, 线性函数 $y=0.051x+0.083$ ($R^2=0.940$) 可更好地拟合毛虫密度与牧草产量损失率之间的关系。因此, 采用线性函数 $y=0.051x+0.083$ 计算草原毛虫的防治经济阈值 (表4)。

2.4 门源草原毛虫的田间防控

田间防控试验结果显示, 不同处理对门源草原毛虫的防治效果存在显著差异。施药后 10 d, 球孢白僵菌与金龟子绿僵菌混合喷施处理的防治效果最高, 为 98.92%; 其次为金龟子绿僵菌单独施用, 防治效果达 97.33% (表5)。

表4 草原毛虫种群密度与牧草产量损失的回归分析

Table 4 Regression analysis of *Gynaephora menyuanensis* population density with the forage yield loss

| 回归模型 Regression model | 回归方程 Equation of regression | R^2 | F | P |
|---------------------------|-----------------------------|-------|--------|--------|
| 线型函数 Linear function | $y=0.051x+0.083$ | 0.940 | 62.700 | <0.001 |
| 复合函数 Composite function | $y=0.122 \times 1.22^x$ | 0.922 | 46.966 | 0.002 |
| 指数函数 Exponential function | $y=0.123 \exp^{0.197x}$ | 0.922 | 6.966 | 0.002 |
| 幂函数 Power function | $y=0.139x^{0.514}$ | 0.798 | 15.781 | 0.017 |
| 对数函数 Logarithm function | $y=0.118+0.128\log(x)$ | 0.786 | 14.705 | 0.019 |

y : 牧草产量损失率; x : 经济阈值。 y : Forage yield loss; x : economic threshold.

2.5 门源草原毛虫经济允许损害水平及经济阈值

结合门源草原毛虫产量损失率试验结果, 测得牧草产量为 4 500 kg/hm², 咨询牧场得出购买 1 kg 牧草价格为 1 元。由于防治成本及防治效果 (10 d) 的差异, 导致经济允许损害水平存在差异 (表6), 根据不同经济允许损害水平, 由虫口密度与牧草产量损失率的回归模型 $y=0.051x+0.083$ 计算草原毛虫经济阈值。结果表明, 采用苏云金芽孢杆菌 Ps3

防治草原毛虫时的经济阈值为 49.35~57.00 头/m², 苏云金芽孢杆菌 G033A 的经济阈值为 41.90~50.53 头/m², 金龟子绿僵菌的经济阈值为 45.43 头/m², 球孢白僵菌的经济阈值为 54.25 头/m²; 球孢白僵菌与苏云金芽孢杆菌 Ps3 混合防治时经济阈值为 90.14 头/m²; 金龟子绿僵菌与苏云金芽孢杆菌 Ps3 混合施用防治时经济阈值最高, 为 90.73 头/m² (表6)。

表5 门源草原毛虫田间防治效果
Table 5 Field control effects of *Gynaephora menyanensis*

| 处理 Treatment | 防治效果 Control efficiency/% | |
|--|------------------------------|----------------|
| | 5 d | 10 d |
| 2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | 20.94±14.89 ab | 76.98±6.00 e |
| 3 000 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 3 000 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | 32.23±10.93 a | 78.14±16.34 e |
| 2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌G033A 2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> G033A | 4.13±39.19 b | 90.09±2.05 bcd |
| 3 000 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌G033A 3 000 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> G033A | 20.94±14.62 ab | 87.63±4.94 cd |
| 750 g/hm ² 球孢白僵菌+2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 | 40.28±15.44 a | 92.54±3.68 abc |
| 750 g/hm ² <i>Beauveria bassiana</i> +2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | | |
| 750 g/hm ² 金龟子绿僵菌+2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 | 39.92±8.89 a | 91.96±3.24 abc |
| 750 g/hm ² <i>Metarhizium anisopliae</i> +2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | | |
| 750 g/hm ² 球孢白僵菌+750 g/hm ² 金龟子绿僵菌 | 49.17±16.87 a | 98.92±0.84 a |
| 750 g/hm ² <i>Beauveria bassiana</i> +750 g/hm ² <i>Metarhizium anisopliae</i> | | |
| 750 g/hm ² 金龟子绿僵菌 750 g/hm ² <i>Metarhizium anisopliae</i> | 45.02±15.50 a | 97.33±1.67 ab |
| 750 g/hm ² 球孢白僵菌 750 g/hm ² <i>Beauveria bassiana</i> | 24.48±21.33 ab | 81.75±1.81 de |

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$)。

表6 门源草原毛虫的经济危害允许水平及其经济阈值

Table 6 The economic injury level and economic threshold of *Gynaephora menyanensis* in paddy field

| 处理 Treatment | 防治成本/ (元/hm ²) Control cost/ (yuan/hm ²) | 经济允许 损害水平 Economic injury level/% | 经济阈值/ (头/m ²) Economic threshold/ (individuals/m ²) |
|--|---|--|---|
| | | | |
| 2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | 45.00 | 2.60 | 49.35 |
| 3 000 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 3 000 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | 52.50 | 2.99 | 57.00 |
| 2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌G033A 2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> G033A | 45.00 | 2.22 | 41.90 |
| 3 000 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌G033A 3 000 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> G033A | 52.50 | 2.66 | 50.53 |
| 750 g/hm ² 球孢白僵菌+2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 | 97.50 | 4.68 | 90.14 |
| 750 g/hm ² <i>Beauveria bassiana</i> +2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | | | |
| 750 g/hm ² 金龟子绿僵菌+2 250 g/hm ² 苏云金芽孢杆菌Ps3 | 97.50 | 4.71 | 90.73 |
| 750 g/hm ² <i>Metarhizium anisopliae</i> +2 250 g/hm ² <i>Bacillus thuringiensis</i> Ps3 | | | |
| 750 g/hm ² 球孢白僵菌+750 g/hm ² 金龟子绿僵菌 | 105.00 | 4.72 | 90.92 |
| 750 g/hm ² <i>Beauveria bassiana</i> +750 g/hm ² <i>Metarhizium anisopliae</i> | | | |
| 750 g/hm ² 金龟子绿僵菌 750 g/hm ² <i>Metarhizium anisopliae</i> | 52.50 | 2.40 | 45.43 |
| 750 g/hm ² 球孢白僵菌 750 g/hm ² <i>Beauveria bassiana</i> | 52.50 | 2.85 | 54.25 |

3 讨论

门源草原毛虫分布广泛,发生密度高,是为害严重的草地害虫之一,也是禾本科植物重要的食叶性害虫。研究发现草原毛虫为多食性昆虫,草原毛虫能采食的植物多达20余种,主要以禾本科、莎草科及豆科植物为主(刘振魁等,1994)。严林等(1995a)研究发现门源草原毛虫高、低龄幼虫可取食16科33属42种植物。张莉君(2021)通过宏条形码测序研究发现门源草原毛虫不同龄期幼虫取食植物物种存在差异,但均喜食针茅属 *Stipa* 和蒿草属

*Kobresia*类植物。万秀莲和张卫国(2006)研究报道认为金黄草原毛虫 *Gynaephora aureata* 喜食5种植物,偏好莎草科、禾本科植物,与本研究结果相似,本研究结果显示,在选取试验植物中门源草原毛虫较喜食禾本科牧草针茅和垂穗披碱草。

本研究结果发现门源草原毛虫随虫龄增加日取食量增大,且各虫龄门源草原毛虫对针茅的取食量、食物利用率和食物转化率存在显著差异,3、4和6龄门源草原毛虫对食物消化率均高于食物利用率,这可能是由于门源草原毛虫的分布地均在

海拔3 000 m以上,幼虫常在7~10 ℃的低温下取食,产生相应的适应性,形成了较低的生长率、食物利用效率和偏高的消化率等具有高寒地区特色的食物利用特点(严林等,1995a)。本研究还发现门源草原毛虫5龄幼虫对针茅取食量与食物消化率较低,但食物转化率高达93.94%,这种高的食物转化率则可能是对低消化率的一种生理补偿(朱俊洪等,2005)。

本研究结果表明,门源草原毛虫种群密度与牧草产量损失整体呈现正相关,并得出线性函数 $y=0.051x+0.083$,但研究还发现当门源草原毛虫密度为10头/m²时的产量损失率较5头/m²低,表明可能存在牧草补偿现象。有研究表明当有害生物危害达到经济允许损害水平之前,植物具有一定的补偿和耐害作用,产量损失无显著变化,而当为害水平超过一定限度时,植物的补偿作用消失,产生易害现象,随危害程度的增加产量迅速下降,直到降低到产量下限水平为止(刘朝阳,2013)。邢旗等(2004)研究发现适当的放牧有利于糙隐子草 *Cleistogenes squarrosa* 种群超补偿生长。

经济阈值的制订除与产量损失率有关,还与所选择的控制方法所产生的防治效果及防治成本有关(Healey et al., 2022)。杨志荣等(1996)研究发现类产碱假单胞菌 *Pseudomonas pseudoalcaligenes* 对草原毛虫致死率仅有14.7%,而采用2%苦参碱水剂施药后的防治效果在90%以上,0.5%蛇床子素水乳剂的防治效果也在85%以上(连欢欢等,2021)。白海涛等(2020)利用昆虫线虫防治黄斑草原毛虫 *Gynaephora alpherakii* 时,发现温度在11 ℃时昆虫病原线虫斯氏线虫 *Steinernema feltiae* SN 处理144 h后草原毛虫的死亡率高达100%;温度在25 ℃时斯氏线虫 *S. carpocapsae* All. & *S. feltiae* SN 线虫处理72 h草原毛虫死亡率均达90%以上。本研究采用多种生物药剂对门源草原毛虫进行防治,10 d后的防治效果均达70%以上,其中金龟子绿僵菌防效达97.33%,球孢白僵菌与金龟子绿僵菌混合施用的防治效果达98.92%。采用苏云金芽孢杆菌G033A防治时的经济阈值为41.90~50.53头/m²,采用金龟子绿僵菌防治时的经济阈值为45.43头/m²,符合岳方正等(2022)认为的我国主要草原有害生物防治指标应 ≥ 30 头/m²的结论。门源草原毛虫的发生为害程度及存活率会随着地区、品种、天敌等因素的变化而变化,因此门源草原毛虫的防治指标也会随之变化(管涵杰等,2023)。防治指标不仅是有害生物综合

治理的基本依据,对病虫害预测预报、科学防治和保护生态环境等也有重要意义(杜娟等,2013)。在对草原毛虫的实际防治中,具体经济阈值的选择还需结合生态学的理论,制订出适合本地区的生态经济阈值,以期为草原毛虫的科学防控提供参考。

参考文献 (References)

- Bai HT, Wang W, Wei XJ, Han RC, Xu CT. 2020. Pathogenicity of entomopathogenic nematodes against *Gynaephora alpherakii* larvae by bioassay. Journal of Environmental Entomology, 42(5): 1269–1274 (in Chinese) [白海涛, 王伟, 魏希杰, 韩日畴, 徐成体. 2020. 昆虫病原线虫对草原毛虫幼虫的致病力. 环境昆虫学报, 42(5): 1269–1274]
- Chen PY, Niu YT, Ju L, Zhou XJ, Feng HQ. 2022. Economic thresholds of summer maize infestation by the *Spodoptera frugiperda* in Nanyang. China Plant Protection, 42(11): 46–50 (in Chinese) [陈培育, 牛银亭, 鞠乐, 周晓静, 封洪强. 2022. 草地贪夜蛾为害南阳地区夏玉米的经济阈值. 中国植保导刊, 42(11): 46–50]
- Cheng JA, Zhang LG, He SZ, Fan QG. 1986. *Mythimna separata* (Walker) economic threshold study (II): harm-loss relationship and economic threshold. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 12(1): 85–92 (in Chinese) [程家安, 章连观, 何孙忠, 范泉根. 1986. 粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 经济阈值的研究(二): 为害与损失关系及经济阈值. 浙江农业大学学报, 12(1): 85–92]
- Du J, Liu YF, Tan SQ, Wu JX. 2013. Control index based on number of adults of *Grapholita molesta* captured by sex pheromone traps. Journal of Plant Protection, 40(2): 140–144 (in Chinese) [杜娟, 刘彦飞, 谭树乾, 仵均祥. 2013. 基于性诱剂监测的梨小食心虫防治指标. 植物保护学报, 40(2): 140–144]
- El-Wakeil EN. 2010. Insect economic levels in relation to crop production. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 43(17): 1710–1744
- Guan HJ, Yang MF, Li S, Wang WQ, Yu XF. 2023. Economic loss and control indexes of tobacco infested by *Myzus persicae* (Sulzer) in Guangxi tobacco-growing area. Journal of Southern Agriculture, 54(8): 2299–2309 (in Chinese) [官涵杰, 杨茂发, 李帅, 王五权, 于晓飞. 2023. 广西烟区烟蚜为害烟草的经济损失及防治指标. 南方农业学报, 54(8): 2299–2309]
- Healey A, Verhey R, Mosweu I, Boadu J, Chibanda D, Chitiyo C, Wagenaar B, Senra H, Chiriseri E, Mboweni S, et al. 2022. Economic threshold analysis of delivering a task-sharing treatment for common mental disorders at scale: the friendship bench, Zimbabwe. Evidence Based Mental Health, 25(2): 47–53
- Kong WW, Wen YF, Wang YX, Wang M, Chen P, Xie CH, Zhou ZH, Zhao YH, Zhou K, Fang ZH, et al. 2024. Feeding selection of 10 Gramineae plants by the *Ceracris kiangsu* Tsai. Journal of Environmental Entomology, 46(1): 127–138 (in Chinese) [孔唯维, 文亦芾, 王艺璇, 王梅, 陈鹏, 谢春华, 周之宏, 赵一鹤, 周凯, 方曾红, 等. 2024. 黄脊竹蝗对10种禾本科植物的取食选择. 环境昆虫学报, 46(1): 127–138]

- Li HC, Xi RH, Chen YL. 1983. Studies on the feeding behaviour of acridoids in the typical steppe subzone of the Nei Mongol Autonomous Region 1: characteristics of food selection within the artificial cages. *Acta Ecologica Sinica*, 3(3): 214–228 [in Chinese] [李鸿昌, 席瑞华, 陈永林. 1983. 内蒙古典型草原蝗虫食性的研究 1: 罩笼供食下的取食特性. 生态学报, 3(3): 214–228]
- Lian HH, Hou XM, Yu HY, Bai CQ. 2021. The pesticide effect research of UAV prevention and control the grassland caterpillar in alpine pastoral area. *Journal of Grassland and Forage Science*, (2): 66–69 [in Chinese] [连欢欢, 侯秀敏, 于红妍, 白重庆. 2021. 高寒牧区无人机防控草原毛虫药效试验. 草学, (2): 66–69]
- Liu CY. 2013. Eco-economic threshold modelling and parameters fitting of grasshoppers in rangeland. Master thesis. Chinese Beijing: Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [刘朝阳. 2013. 草原蝗虫生态经济阈值参数拟合及模型构建. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Liu YL, Lü BQ, Lu H, Tang JH, Zhang YJ, Zhu XM. 2021. Effect of different population density of *Spodoptera frugiperda* on the yield of corn and its economic threshold. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 42(12): 3394–3401 [in Chinese] [刘彦龙, 吕宝乾, 卢辉, 唐继洪, 张永军, 朱晓明. 2021. 草地贪夜蛾不同虫口密度对海南鲜食玉米产量的影响及其经济阈值研究. 热带作物学报, 42(12): 3394–3401]
- Liu ZK, Yan L, Mei JR, Huo KK. 1994. Scanning electron microscopic observations on the chorionic structural features of four grassland caterpillars from Qinghai Province. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 24(2): 1–4 [in Chinese] [刘振魁, 严林, 梅洁人, 霍科科. 1994. 青海省四种草原毛虫卵壳表面特征的扫描电镜观察. 青海畜牧兽医杂志, 24(2): 1–4]
- Lv YY, Zhang JG, Chen W, Sun Y, Li M, Yu HY, Yi SH, Meng BP. 2023. Mapping of *Gynaephora alpherakii* inhabitability area in the national park of Qilian Mountain, China. *Agronomy*, 13(2): 594
- Nan YB, Zhang Y, He QY, Chen S, Zhou YT. 2023. Bioinformatics analysis on the odorant binding protein genes in *Gynaephora qinghaiensis*. *Acta Agrestia Sinica*, 31(3): 688–698 [in Chinese] [南彦斌, 张月, 何啟明, 陈帅, 周渊涛. 2023. 青海草原毛虫气味结合蛋白基因与生物信息学分析. 草地学报, 31(3): 688–698]
- Nima, He SD, Li CY. 2011. Effects of *Gynaephora* on *Bos grunniens* stomatitis. *Prataculture & Animal Husbandry*, (4): 47–48 [in Chinese] [尼玛, 河生德, 李长云. 2011. 草原毛虫引起牦牛口膜炎的防治效果观察. 草业与畜牧, (4): 47–48]
- Stern VM, Smith RF, van den Bosch R. 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted aphid. *Hilgardia*, 29 (2): 81–101
- Wan XL, Zhang WG. 2006. Feeding habit and spatial pattern of *Gynaephora alpherakii* larvae. *Acta Agrestia Sinica*, 14(1): 84–88 [in Chinese] [万秀莲, 张卫国. 2006. 草原毛虫幼虫的食性及其空间格局. 草地学报, 14(1): 84–88]
- Wang HZ, Liu X. 2022. Distribution of *Gynaephora qinghaiensis* population and its effect on habitat grassland vegetation in Yushu Prefecture. *Journal of Environmental Entomology*, 44(4): 891–902 [in Chinese] [王海贞, 刘昕. 2022. 玉树州境内草原毛虫种群分布及其对生境草场植被的影响. 环境昆虫学报, 44(4): 891–902]
- Xing Q, Shuang Q, Jin Y, Song M. 2010. Studies on matter dynamics and plant compensatory growth under different grazing systems on meadow steppe. *Animal Husbandry and Feed Science*, 31(增刊1): 274–277 [in Chinese] [邢旗, 双全, 金玉, 松梅. 2010. 草甸草原不同放牧制度群落物质动态及植物补偿性生长研究. 畜牧与饲料科学, 31(Supp. 1): 274–277]
- Yan L, Liu ZK, Mei JR, Lan JH. 1995a. Feed selection and utilization of grassland caterpillar in the field cage condition. *Acta Agrestia Sinica*, 3(4): 257–268 [in Chinese] [严林, 刘振魁, 梅洁人, 兰景华. 1995a. 野外扣笼条件下草原毛虫对食物的选择. 草地学报, 3(4): 257–268]
- Yan L, Yu YH, Lan JH. 1995b. Determination of *Gynaephora menyuanensis* larval instar. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 24(5): 13–15 [in Chinese] [严林, 余英花, 兰景华. 1995b. 草原毛虫幼虫虫龄的判别. 青海畜牧兽医杂志, 24 (5): 13–15]
- Yang ZR, Zhu W, Ge SR, Hou RT, Liu SG, Wang ZG, Li T, Yan SS, Wang GL. 1996. Study on biological control of grassland locust by *Pseudomonas pseudoalcaligenes*. *Chinese Journal of Biological Control*, 12(2): 55–57 [in Chinese] [杨志荣, 朱文, 葛绍荣, 侯若彤, 刘世贵, 汪志刚, 李韬, 闫省三, 王贵林. 1996. 类产碱假单胞菌防治草地蝗虫的研究. 中国生物防治, 12(2): 55–57]
- Yu HC, Chen JH, Sun LF, Song XD, Wang CR, Zhuang BL, Li RZ. 2021. Study on relationship between population density and yield loss of spring maize and economic threshold of armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Journal of Northeast Agricultural University*, 52(3): 13–19 [in Chinese] [于洪春, 陈佳欢, 孙苓美, 宋显东, 王春荣, 庄宝龙, 李润钊. 2021. 黏虫虫口密度与春玉米产量损失关系及经济阈值研究. 东北农业大学学报, 52(3): 13–19]
- Yue FZ, Li X, Yang D, Wang ZP, Xu ZT, Hua LM, Tu XB, Wang BY, Han HB, Chai SQ. 2022. Establishment and analysis of key pest control indicators in grasslands in China. *Pratacultural Science*, 39(9): 1773–1781 [in Chinese] [岳方正, 李璇, 杨鼎, 王志鹏, 徐震霆, 花立民, 涂雄兵, 王炳煜, 韩海斌, 柴守权. 2022. 我国主要草原有害生物防治指标制定与分析. 草业科学, 39(9): 1773–1781]
- Zhang HH, Guo ZM, Wang XH, Mou JY, Xu HF. 2000. Control index of the fourth generation bellworm in summer soybean. *Shandong Agricultural Sciences*, (4): 38 [in Chinese] [张海厚, 郭泽民, 王晓辉, 牟吉元, 徐洪富. 2000. 第4代棉铃虫危害夏大豆防治指标研究. 山东农业科学, (4): 38]
- Zhang LJ. 2021. Feeding range and temporal dynamics of larvae of *Gynaephora menyuanensis*. Master thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese) [张莉君. 2021. 门源草原毛虫幼虫的食性范围及时间动态. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学]
- Zhu JH, Zhang FP, Ren HG. 2005. Development and nutrition of *Prodenia litura* on four food plants. *Entomological Knowledge*, 42(6): 643–646 [in Chinese] [朱俊洪, 张方平, 任洪刚. 2005. 四种食料植物对斜纹夜蛾生长发育及营养指标的影响. 昆虫知识, 42(6): 643–646]

(责任编辑:王璇)