

# 大球盖菇跳虫的土壤分布、危害调查 及药剂防治技术

张小艳<sup>1</sup> 张康<sup>2</sup> 王清文<sup>2</sup> 王雪成<sup>1</sup> 黄振<sup>3</sup> 沙小芳<sup>1</sup>  
袁向群<sup>1</sup> 李怡萍<sup>1\*</sup>

(1. 西北农林科技大学植物保护学院, 植保资源与病虫害治理教育部重点实验室, 农业农村部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 汉中市农业技术推广与培训中心, 陕西 汉中 723000;  
3. 陕西金西生物科技发展有限公司, 汉中 723000)

**摘要:** 为明确大球盖菇 *Stropharia rugosoannulata* 土壤中跳虫的种群特征及筛选防控跳虫的有效药剂, 采用五点取样法调查土壤中跳虫种群密度及对子实体的为害程度, 通过聚集指数分析跳虫的分布特征; 采用菇片浸渍法测定 10 种杀虫剂对跳虫的室内毒力, 筛选有效药剂并进行田间防治试验; 通过平板加药法评估有效药剂对大球盖菇菌丝生长的影响, 检测菌丝中的药剂残留。结果表明: 大球盖菇土壤中跳虫平均密度为  $7.15 \times 10^4$  头/m<sup>2</sup>, 在菇棚内呈均匀分布, 对子实体的为害率达 60%。共筛选出 7 种有效防治药剂, 其中 4.3% 氯氟·甲维盐乳油、4.5% 高效氯氟菊酯乳油、2.5% 高效氯氟菊酯水乳剂和 1.8% 阿维菌素乳油对跳虫的田间防治效果显著, 防治效果分别为 89.09%、84.85%、80.34% 和 86.93%, 且对大球盖菇菌丝生长的抑制率低, 未检测到药剂残留, 可在生产中推广应用。

**关键词:** 跳虫; 大球盖菇; 危害调查; 空间分布; 药剂防治; 残留检测

## Soil distribution, damage investigation and chemical control of springtails on wine cap mushroom *Stropharia rugosoannulata*

Zhang Xiaoyan<sup>1</sup> Zhang Kang<sup>2</sup> Wang Qingwen<sup>2</sup> Wang Xuecheng<sup>1</sup> Huang Zhen<sup>3</sup>  
Sha Xiaofang<sup>1</sup> Yuan Xiangqun<sup>1</sup> Li Yiping<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in the Northwestern Loess Plateau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Plant Protection Resources and Pest Management of Ministry of Education, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. Hanzhong Agricultural Technology Promotion and Training Center, Hanzhong 723000, Shaanxi Province, China; 3. Shaanxi Jinxi Biotechnology Development Co., Ltd., Hanzhong 723000, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** To clarify the population characteristics of springtails in the soil of wine cap mushroom *Stropharia rugosoannulata*, and to screen effective insecticides for their control, the population density of springtails and the damage to fruiting bodies were investigated using a five-point sampling method, and their spatial distribution was analyzed using aggregation indices. The laboratory toxicity of ten insecticides to springtails was evaluated using the mushroom slice dipping method, and effective insecticides were selected for field control trials. In addition, the effects of the selected insecticides on mycelial growth were assessed using a plate incorporation method, and pesticide residues in the mycelia were detected. The results showed that the average density of springtails in the soil of *S. rugosoannulata* was

$7.15 \times 10^4/m^2$  individuals, with a uniform distribution in mushroom sheds, and the damage rate to fruiting bodies reached 60%. Seven effective insecticides were screened, among which 4.3% chlorfluazuron-emamectin benzoate emulsifiable concentrate, 4.5% beta-cypermethrin emulsifiable concentrate, 2.5% lambda-cyhalothrin emulsion in water, and 1.8% abamectin emulsifiable concentrate showed significant control effects on springtails, with control efficacies of 89.09%, 84.85%, 80.34% and 86.93%, respectively. These insecticides exhibited low inhibitory effects on the mycelial growth of *S. rugosoannulata*, and no pesticide residues were detected in the mycelia, indicating their suitability for practical application in production.

**Key words:** springtails; *Stropharia rugosoannulata*; damage investigation; spatial distribution; chemical control; residue detection

食用菌是一类可供人类食用的高等真菌,具有丰富的营养价值,其不仅热量低,还富含类黄酮、酚类化合物及多糖等多种活性成分,具有抗氧化、调节代谢紊乱、改善肠道环境以及增强免疫系统等功能(邓仔云等,2025)。大球盖菇 *Stropharia rugosoannulata*, 又称赤松茸或彩云菇,隶属于担子菌门伞菌纲伞菌目球盖菇科球盖菇属 *Stropharia*, 是一种被广泛种植的食用菌。大球盖菇不仅味道鲜美,还具有药用价值和生物修复功能,是国际菌类交易市场上的十大菌类之一,也是联合国粮食和农业组织推荐栽培的食(药)用菌种类之一(Guo et al., 2023; 骆庆等, 2023; 李超等, 2024)。近年来,因大球盖菇具有独特的营养价值和生态功能而受到广泛关注,其强大的纤维素分解能力可以改善土壤性质,提高产量,同时为后续作物种植创造良好的土壤条件,这也是大球盖菇种植面积逐步扩大的重要原因之一。然而,在大球盖菇种植过程中,由于培养料、菌丝及子实体营养丰富,加之栽培环境黑暗潮湿,容易滋生异迟眼蕈蚊 *Bradysia impatiens*、东方滨棘跳虫 *Thalassaphorura orientalis* 以及腐食酪螨 *Tyrophagus putrescentiae* 等害虫(姜婷婷等, 2023; 马林等, 2024)。跳虫对大球盖菇的为害严重,可导致子实体畸形、腐烂,给菇农造成严重的经济损失,制约了食用菌产业的可持续发展。因此,急需对食用菌跳虫进行防治,以保障食用菌产业的绿色发展。

跳虫隶属于节肢动物门弹尾纲弹尾目,是一类原生无翅且具有附肢的内口式低等六足动物(陈伟等, 2020)。跳虫分布范围极为广泛,种类丰富多样,数量庞大,常栖息于如垃圾、枯木、堆肥等腐败物质以及较阴暗潮湿的环境中(朱富春, 2017)。空间分布结构是种群的重要特征之一,对了解其猖獗、扩散

行为及持续控制具有重要意义(巍薇等, 2013)。Xu et al. (2024)采用陷阱法对田间土壤跳虫进行了调查,并通过计算获得了跳虫的密度和丰富度,为及时掌握跳虫的数量及为害情况提供依据。李进(2019)调查发现云南省兰坪白族普米族自治县(简称兰坪县)铅锌矿区周边的农田跳虫密度可达  $12\ 042$  头/ $m^2$ ,表明其不仅种群数量庞大,而且繁殖速度较快。王晓科等(2018)研究表明,跳虫的食物来源主要包括腐殖质和真菌,在食用菌种植时,许多菌种如大球盖菇和木耳 *Auricularia auricular* 直接播种于土壤中,其菌丝及子实体极易受到跳虫为害(林金盛等, 2020)。跳虫通常取食食用菌的菌丝,抑制菌丝生长;在子实体形成后,跳虫又会取食子实体,导致食用菌表面出现大量不规则孔道,严重影响其品质和产量。此外,跳虫还可能携带害螨,进而引发多种病害(朱富春, 2017)。而跳虫自身的生理结构为其扩散蔓延提供了便利,使其难以控制,而且其第4腹节具有弹器,这一特殊结构能让它轻松弹跳,不仅可快速扩散至周边菌床,还能扩大为害范围,显著影响食用菌产量和品质(贾少波等, 2009; Fiera et al., 2020)。

跳虫个体较小,潜伏隐蔽性强,在生产中难以发现。目前,针对跳虫的防治工作多集中在其发生为害的阶段,且防治手段主要依赖于单一药剂的化学防治(朱富春, 2017)。在我国登记注册且可用于防治食用菌害虫的药剂较少。在大球盖菇的生产过程中,拟除虫菊酯类杀虫剂是常用的防治药剂,这些杀虫剂在发挥药效时可能会渗透至食用菌内部,且在一定时间内难以分解,从而导致食用菌出现严重的农药残留问题,不利于食用菌产业的绿色发展。因此,急需安全有效的药剂来防治大球盖菇跳虫(李学

锋等,2000)。本研究在调查大球盖菇种植基地跳虫的分布及为害的基础上,开展了室内和室外跳虫防治药剂的筛选试验,测定了不同药剂对大球盖菇菌丝生长的影响,同时检测药剂残留,以期为食用菌害虫绿色防控技术体系的构建提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试虫源及菌类:东方滨棘跳虫采集于陕西省西乡县金西生物科技有限公司食用菌基地。将采集到的跳虫放于人工气候箱内,将石膏粉和活性炭按体积比9:1混匀,加适量蒸馏水搅拌成糊状,制成传统的石膏粉-活性炭培养基进行饲养,将跳虫饲养至成虫期备用。在温度(20±0.5)℃、湿度(70±10)%、黑暗条件下饲养(赵岩等,2011)。大球盖菇由西乡县金西生物科技有限公司种植并提供。

供试培养基:马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基成分为马铃薯200 g、蒸馏水1 L、葡萄糖20 g、琼脂粉13 g。

药剂、试剂及仪器:1.8%阿维菌素(abamectin)乳油,邯郸市瑞田农药有限公司;0.3%苦参碱(matrine)水剂、2.5%高效氯氟氰菊酯(lambda-cyhalothrin)水乳剂,杨凌馥稷生物科技有限公司;5%鱼藤酮(rotenone)微乳剂,北京三浦百草绿色植物制剂有限公司;0.3%印楝素(azadirachtin)乳油,成都绿金生物科技有限责任公司;4.5%高效氯氟氰菊酯(beta-cypermethrin)乳油、4.3%氯氟·甲维盐(lambda-cyhalothrin and emamectin benzoate)乳油,江苏苏科农化有限公司;2.5%溴氰菊酯(deltamethrin)乳油,山东邹平农药有限公司;25%吡虫啉(imidacloprid)可湿性粉剂,盐城利民农化有限公司;22.4%螺虫乙酯(spirotetramat)悬浮剂,河北润达农药化工有限公司。磷酸盐缓冲溶液(phosphate buffer solution, PBS缓冲液),上海吉至生化科技有限公司;其他试剂均为国产分析纯。18 L背负式手动喷雾器,山东先瑞智能科技有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 大球盖菇土壤跳虫的调查

选取陕西省西乡县金西生物科技有限公司食用菌基地的3个大球盖菇大棚进行调查,每个大棚面积约为333.5 m<sup>2</sup>,平均划分9个小区,每个小区大小为宽5 m×长7 m。每个小区采取五点取样调查土壤中的跳虫,每点取1个长15 cm×宽15 cm×深15 cm

样方的土壤,每个样方随机量取30 cm<sup>3</sup>土样,记录土样中东方滨棘跳虫的数量,每个样方取土样3次。然后按比例换算成每平方米的跳虫数量。

#### 1.2.2 跳虫在大球盖菇土壤中的空间分布型

参考1.2.1方法进行取样,空间分布型参考周海波等(2009)、王伟等(2016)的方法进行分析,计算聚集度指数,明确在0~15 cm深土壤中跳虫的分布格局,计算出拥挤度 $M^*$ 、扩散系数 $C$ 、丛生指数 $I$ 、聚块性指标、聚集度指数 $Ca$ 及负二项分布中的 $K$ 指标, $M^*=m+V/m-1$ , $C=V/m$ , $I=V/m-1$ ,聚块性指标= $M^*/m$ , $Ca=(V-m)/m^2$ , $K=m^2/(V-m)$ ,式中 $m$ 为采样方平均密度、 $V$ 为方差。当 $C>1$ 、 $M^*/m>1$ 、 $I>0$ 、 $Ca>0$ 、 $8>K>0$ 时,说明种群为聚集分布;当 $C<1$ 、 $M^*/m<1$ 、 $I<0$ 、 $Ca<0$ 、 $K<0$ 时,说明种群均匀分布;当 $C=1$ 、 $M^*/m=0$ 、 $I=0$ 、 $Ca=0$ 、 $8<K\rightarrow\infty$ 时,说明种群为随机分布。共统计3个大球盖菇大棚的数据,每个菇棚为1个重复。

#### 1.2.3 跳虫对大球盖菇子实体的危害调查

在跳虫为害大球盖菇子实体时期,选取3个大球盖菇大棚,每个大棚面积约为333.5 m<sup>2</sup>,平均划分9个小区,每个小区采用五点取样法进行调查,方法同1.2.1,每点调查10个大球盖菇子实体,子实体表面出现孔洞等典型为害症状即视为受害,统计受害子实体数量,并计算各小区的为害率。为害率=被为害的子实体数量/调查总子实体数量×100%。

#### 1.2.4 10种杀虫剂对跳虫的室内毒力测定

采用菇片浸渍法测定10种药剂的室内毒力,药剂及其稀释倍数分别为1.8%阿维菌素乳油2 500倍、0.3%苦参碱水剂600倍、5%鱼藤酮微乳剂1 000倍、0.3%印楝素乳油500倍、2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂1 000倍、4.5%高效氯氟氰菊酯乳油1 000倍、2.5%溴氰菊酯乳油1 500倍、4.3%氯氟·甲维盐乳油1 125倍、25%吡虫啉可湿性粉剂1 500倍和22.4%螺虫乙酯悬浮剂4 000倍。把大球盖菇切成大小一致的薄片,浸入药液10 s后取出,并放入直径9 cm的培养皿中,以清水处理作为对照组。每个培养皿中接入30头跳虫,重复3次,每个重复为1个培养皿。在接虫1、3、5和7 d后,对每个培养皿内存活的跳虫数量进行统计,并计算死亡率、校正死亡率及防治效果(严海娟和刘贤进,2012)。死亡率=(药前虫口数-药后虫口数)/药前虫口数×100%;校正死亡率=(处理组死亡率-对照组死亡率)/(1-对照组死亡率)×100%;虫口减退率=(药前虫口数-药后虫口数)/药前虫口数×100%;防治效果=(处理虫口减退率-对照虫口减退率)/(1-对照虫口减退率)×100%。

### 1.2.5 大球盖菇田间跳虫防治药剂筛选

在大球盖菇大棚土壤跳虫发生时期,根据室内药剂毒力测定试验结果选择1.8%阿维菌素乳油、0.3%苦参碱水剂、2.5%高效氯氰菊酯水乳剂、4.5%高效氯氰菊酯乳油、4.3%氯氟·甲维盐乳油、22.4%螺虫乙酯悬浮剂和25%吡虫啉可湿性粉剂这7种药剂进行田间试验,药剂稀释倍数同1.2.4,喷施量分别为7.2、30、18、18、16、4.5 mL和12 g。选择8个大球盖菇生长一致的大棚,每个大棚面积333.5 m<sup>2</sup>,使用18 L背负式手动喷雾器喷施药剂。每个药剂处理1个大棚,以喷施清水作为对照组。采用五点法取样法进行调查,每点取长15 cm×宽15 cm×深15 cm的土壤样方,每个土壤样方量取30 cm<sup>3</sup>土样,每个样方重复取样3次。记录施药前和药后7、15 d每个样方的跳虫数量,计算每种药剂对跳虫的防治效果,计算公式同1.2.4。

### 1.2.6 药剂对大球盖菇菌丝生长的影响

在PDA培养基上培养大球盖菇菌种7 d,待菌丝快长满培养皿时进行试验。根据田间测定试验结果,测定4.5%高效氯氰菊酯乳油1 000倍稀释液、4.3%氯氟·甲维盐乳油1 125倍稀释液、2.5%高效氯氰菊酯水乳剂1 000倍稀释液、1.8%阿维菌素乳油2 500倍稀释液和0.3%苦参碱水剂600倍稀释液对大球盖菇菌丝生长的影响,每种药剂设置3次重复。分别取1 mL配制好的药剂加到灭菌的PDA培养基中,以加入等量无菌水作对照组,充分混匀并倒入直径为9 cm的培养皿中。选择长势较好的大球盖菇菌丝,用直径6 mm的打孔器打取菌饼,取1个菌饼接入到培养皿中,于温度23~25 ℃、相对湿度60%~65%、黑暗条件下培养,定期观察菌落生长情况。当对照组菌丝长满培养皿时,采用十字交叉法测量菌落直径,并计算药剂对大球盖菇菌丝生长的抑制率(李怡萍等,2009;莫亿伟等,2019)。抑菌率=(对照组菌丝生长量-处理组菌丝生长量)/对照组菌丝生长量×100%。

### 1.2.7 大球盖菇药剂残留检测

选取抑菌率较低的2.5%高效氯氰菊酯水乳剂1 000倍稀释液、4.5%高效氯氰菊酯乳油1 000倍稀释液、4.3%氯氟·甲维盐乳油1 125倍稀释液和1.8%阿维菌素乳油2 500倍稀释液这4种药剂进行残留检测。每种药剂田间喷施方法同1.2.5,每种药剂设置3次重复,每个重复喷施10个长势均匀的大球盖菇,在大球盖菇子实体生长初期,将药剂喷施至大球盖菇表面,直到湿润欲滴为止。喷施7 d后采集大球

盖菇子实体,每个处理取3个重复的混合样300 g,委托谱尼测试集团陕西有限公司采用色谱法对农药残留进行检测(杨珂,2017)。

### 1.3 数据分析

试验数据使用SPSS 26.0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,使用Graphpad prism 8.0软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 大球盖菇土壤跳虫的调查结果

将数据按比例换算成土壤表面15 cm深处每平方米所含东方滨棘跳虫数量,结果表明,1号菇棚中跳虫平均数量约7.22×10<sup>4</sup>头/m<sup>2</sup>,2号菇棚跳虫平均数量约7.40×10<sup>4</sup>头/m<sup>2</sup>,3号菇棚跳虫平均数量约6.83×10<sup>4</sup>头/m<sup>2</sup>,3个大棚中跳虫数量平均为7.15×10<sup>4</sup>头/m<sup>2</sup>(表1)。

表1 3个菇棚中东方滨棘跳虫数量

试验小区 Experimental plot	mushroom sheds		
	1号菇棚 Shed No.1	2号菇棚 Shed No.2	3号菇棚 Shed No.3
1	7.93±0.32	7.81±0.52	7.00±0.24
2	6.39±0.45	7.17±0.52	6.53±0.65
3	7.83±0.50	7.43±0.26	7.30±0.31
4	8.30±0.61	7.63±0.24	6.40±0.40
5	7.70±0.24	7.47±0.68	6.66±0.27
6	5.52±0.45	6.35±0.23	6.13±0.51
7	6.86±0.56	7.20±0.68	7.47±0.32
8	5.83±0.47	7.74±0.36	6.90±0.73
9	8.89±0.54	7.74±0.36	7.08±0.24
平均数 Mean	7.22±0.37	7.40±0.15	6.83±0.15

表中数据为平均数±标准误。Data in the table are mean±SE.

### 2.2 跳虫在大球盖菇土壤中的空间分布型

东方滨棘跳虫聚集度指标分析结果表明,3次调查中反映聚集度的指标均满足C<1、M\*/m<1、I<0、Ca<0、K<0(表2),因此,推断跳虫在大棚内的空间分布型为均匀分布。

### 2.3 东方滨棘跳虫对大球盖菇子实体的危害调查结果

东方滨棘跳虫对1号、2号和3号大棚中大球盖菇子实体的平均为害率分别为70.00%、66.29%和65.56%,对3个菇棚子实体的平均为害率达67.28%。整体上看1号菇棚内子实体受害最严重,跳虫为害率介于63.33%~90.00%之间;2号菇棚受害次之(表3)。

表2 东方滨棘跳虫聚集度指标

Table 2 Aggregation index of *Thalassaphorura orientalis*

菇棚编号 Mushroom shed No.	平均密度 m Mean density/ (头/cm <sup>3</sup> )	方差 Variance	平均拥挤度 Mean crowding M'	丛生 指标 Clumoiing index I	聚块性指标 Pachiness index M'/m	聚集度 指数 Aggregation index Ca	负二项分布 Negative binomial parameter K	扩散系数 Diffusion coefficient C	分布型 Distribution pattern
1	0.481	0.022	-0.969	-0.042	-2.015	-1.984	-0.504	0.046	均匀分布 Uniform distribution
2	0.493	0.013	-0.998	-0.026	-2.024	-1.975	-0.506	0.026	均匀分布 Uniform distribution
3	0.455	0.014	-0.861	-0.026	-1.892	-2.130	-0.469	0.031	均匀分布 Uniform distribution

表3 东方滨棘跳虫对大球盖菇子实体的为害率

Table 3 Damage rate of *Thalassaphorura orientalis* to the fruiting bodies of *Stropharia rugosoannulata* %

试验小区 Experimental plot	1号菇棚 Shed No. 1	2号菇棚 Shed No. 2	3号菇棚 Shed No. 3
1	70.00±1.15	43.33±0.67	60.00±0.58
2	63.33±0.88	63.33±0.33	83.33±0.88
3	90.00±0.58	80.00±1.00	63.33±0.88
4	43.33±0.67	56.67±0.88	50.00±1.00
5	73.33±0.88	63.33±0.33	73.33±0.33
6	66.67±0.67	53.33±0.88	36.67±0.88
7	73.33±0.33	83.33±0.88	83.33±1.20
8	86.67±0.67	80.00±0.58	83.33±1.20
9	63.33±0.88	73.33±0.33	56.76±1.20
平均数 Mean	70.00±4.58	66.29±4.60	65.56±5.52

表中数据为平均数±标准误。Data in the table are mean±SE.

## 2.4 10种杀虫剂对东方滨棘跳虫的室内毒力

室内药剂毒力测定结果显示,药后1 d,对照组的死亡率为7.78%,1.8%阿维菌素乳油处理下跳虫的死亡率为77.78%,校正死亡率最高,为75.90%;2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂和4.3%氯氟·甲维盐乳油处理下跳虫的校正死亡率分别为72.29%和71.08%,2种药剂间无显著性差异。药后3 d,对照组的死亡率是13.33%,4.3%氯氟·甲维盐乳油处理下跳虫的校正死亡率最高,为85.90%。药后5 d,1.8%阿维菌素乳油和4.3%氯氟·甲维盐乳油的校正死亡率均高于90.00%;2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂、0.3%苦参碱水剂、25%吡虫啉可湿性粉剂和4.5%高效氯氟氰菊酯乳油处理下跳虫的校正死亡率均达到80.00%以上。药后7 d,4.3%氯氟·甲维盐乳油、1.8%阿维菌素乳油、2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂、0.3%苦参碱水剂和25%吡虫啉可湿性粉剂处理下跳虫的校正死亡率均达到90.00%以上,几种药剂间均无显著差异(表4)。

综合分析跳虫室内药剂试验结果,在药后7 d,4.3%氯氟·甲维盐乳油、1.8%阿维菌素乳油、2.5%

高效氯氟氰菊酯水乳剂、0.3%苦参碱水剂、25%吡虫啉可湿性粉剂这5种药剂处理下跳虫的校正死亡率均达到90.00%,说明防治效果最好,其次4.5%高效氯氟氰菊酯乳油和22.4%螺虫乙酯悬浮剂处理下跳虫的校正死亡率都达到了80.00%,说明防治效果较好。而2.5%溴氰菊酯乳油、0.3%印楝素乳油、5%鱼藤酮微乳剂3种药剂处理下跳虫的校正死亡率较低。因此选择4.3%氯氟·甲维盐乳油、1.8%阿维菌素乳油、2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂、0.3%苦参碱水剂、25%吡虫啉可湿性粉剂、4.5%高效氯氟氰菊酯乳油和22.4%螺虫乙酯悬浮剂进行田间药剂筛选。

## 2.5 东方滨棘跳虫的田间药剂筛选

田间药剂试验结果显示,药后15 d,4.3%氯氟·甲维盐乳油、1.8%阿维菌素乳油防治效果分别为89.09%和86.93%,显著高于其他药剂( $P<0.05$ );4.5%高效氯氟氰菊酯乳油、0.3%苦参碱水剂和2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂的防治效果均无显著差异,防治效果分别为84.85%、80.34%和79.86%。25%吡虫啉可湿性粉剂、22.4%螺虫乙酯悬浮剂的防治效果分别为74.78%和70.18%,这2种药剂的防治效果显著低于其他5种药剂( $P<0.05$ ,图1)。

## 2.6 药剂对大球盖菇菌丝生长的影响

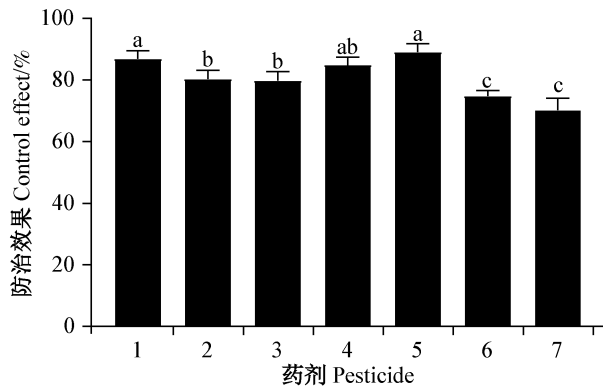
药剂对大球盖菇菌丝生长的影响结果显示,4.5%高效氯氟氰菊酯乳油对菌丝生长的抑制率最低,为13.16%;4.3%氯氟·甲维盐乳油对菌丝生长的抑制率次之,为14.66%,这2种药剂的抑菌率显著低于其他3种药剂( $P<0.05$ )。2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂、1.8%阿维菌素乳油的抑菌率分别为21.33%和25.84%,这2种药剂对于菌丝的生长有一定抑制作用,且抑菌率均低于30%。0.3%苦参碱水剂虽然对跳虫的防治效果较好,但其对菌丝生长的抑制作用较强,抑菌率达到32.32%,显著高于其他4种药剂( $P<0.05$ ,表5)。

表 4 10种药剂对东方滨棘跳虫的室内毒力

Table 4 Laboratory toxicity of ten pesticides against *Thalassaphorura orientalis*

药剂名称 Pesticide	稀释倍 数 Dilution times	药剂处理后 1 d 1 d after treatment		药剂处理后 3 d 3 d after treatment		药剂处理后 5 d 5 d after treatment		药剂处理后 7 d After treated 7 d	
		死亡率 Mortality	校正死亡率 Corrected mortality	死亡率 Mortality	校正死亡率 Corrected mortality	死亡率 Mortality	校正死亡率 Corrected mortality	死亡率 Mortality	校正死亡率 Corrected mortality
		% %		% %		% %		% %	
1.8%阿维菌素乳油	2 500	77.78±2.94 a	75.90±3.19 a	85.56±2.94 ab	83.33±3.39 ab	93.33±3.85 a	91.55±4.88 a	97.78±1.11 a	97.01±1.49 a
1.8% abamec-tin EC									
0.3%苦参碱水剂	600	68.89±4.01 ab	66.26±4.34 ab	83.33±3.85 ab	80.77±4.44 ab	88.89±1.11 ab	85.92±1.41 ab	95.56±1.11 a	94.03±1.49 a
0.3% matrine AS									
5%鱼藤酮微乳剂	1 000	50.00±5.09 d	45.78±5.52 d	57.78±2.22 e	51.28±2.56 e	71.11±2.94 de	63.38±3.73 de	75.56±2.94 d	67.16±3.95 d
5% rotenone ME									
0.3%印楝素乳油	500	45.56±4.01 d	40.96±4.34 d	58.89±4.01 e	52.57±4.62 e	67.78±4.01 e	59.16±5.08 e	72.22±4.84 d	62.68±6.51 d
0.3% azadirachtin EC									
2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂	1 000	74.44±4.01 ab	72.29±4.34 ab	82.22±2.94 ab	79.49±3.39 ab	91.11±2.94 a	88.73±3.73 a	96.67±1.93 a	95.52±2.59 a
2.5% lambda-cyhalothrin EW									
4.5%高效氯氟氰菊酯乳油	1 000	63.33±3.85 bc	60.24±4.17 bc	74.44±2.22 bcd	70.51±2.56 bcd	84.44±2.22 abc	80.28±2.82 abc	92.22±2.94 ab	89.55±3.95 ab
4.5% beta-cypermethrin EC									
2.5%溴氰菊酯乳油	1 500	54.44±2.94 cd	50.60±3.19 cd	64.44±2.94 de	58.98±3.39 de	76.67±5.09 cde	70.42±6.45 cde	78.89±4.01 cd	71.64±5.38 cd
2.5% deltamethrin EC									
4.3%氯氟·甲维盐乳油	1 125	73.33±3.33 ab	71.08±3.61 ab	87.78±4.01 a	85.90±4.62 a	92.22±2.94 a	90.14±3.73 a	98.89±1.11 a	98.51±1.49 a
4.3% chlorofluoro-emamectin benzoate EC									
25%吡虫啉可湿性粉剂	1 500	65.56±5.56 abc	62.65±6.02 abc	76.67±5.09 abc	73.08±5.87 abc	88.89±2.22 ab	85.92±2.82 ab	93.33±1.93 ab	91.04±2.59 ab
25% imidacloprid WP									
22.4%螺虫乙酯悬浮剂	4 000	55.56±4.01 cd	51.81±4.34 cd	68.89±4.01 cde	64.10±4.62 cde	78.89±4.84 bcd	73.24±6.14 bcd	85.56±2.94 bc	80.60±3.95 bc
22.4% spirotetramat SC									
对照 CK	—	7.78	—	13.33	—	21.11	—	25.56	—

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



1:1.8%阿维菌素乳油;2:0.3%苦参碱水剂;3:2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂;4:4.5%高效氯氟菊酯乳油;5:4.3%氯氟·甲维盐乳油;6:25%吡虫啉可湿性粉剂;7:22.4%螺虫乙酯悬浮剂。1: 1.8% abamectin EC; 2: 0.3% matrine AS; 3: 2.5% lambda-cyhalothrin EW; 4: 4.5% beta-cypermethrin EC; 5: 4.3% chlorofluoro-emamectin benzoate EC; 6: 25% imidacloprid WP; 7: 22.4% spirotetramat SC.

图1 7种药剂在药后15 d对东方滨棘跳虫的田间防治效果

Fig. 1 Field control efficacy of seven pesticides against *Thalassaphorura orientalis* at 15 d after treatment

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示不同处理间经Duncan氏新复极差法检验差异显著( $P<0.05$ )。Data in the figure are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments by Duncan's multiple range test ( $P<0.05$ ).

## 2.7 大球盖菇中的药剂残留检测

药剂残留检测结果显示,药后7 d,2.5%高效氯

氟氰菊酯水乳剂、4.5%高效氯氟菊酯乳油、4.3%氯氟·甲维盐乳油和1.8%阿维菌素乳油在检测范围内均没有检测到残留(表6),表明这4种药剂对跳虫防治效果较好、对菌丝生长抑制作用较低的同时不会因残留问题而有害人体健康。

表5 5种药剂对大球盖菇菌丝的抑制率

Table 5 Inhibition rates of five insecticides on the mycelial growth of *Stropharia rugosoannulata*

药剂 Pesticide	稀释倍数 Dilution time	菌丝直径 Mycelial diameter/cm	抑菌率 Inhibition rate/%
4.5%高效氯氟菊酯乳油 4.5% beta-cypermethrin EC	1 000	7.17±0.12 a	13.16±1.46 d
4.3%氯氟·甲维盐乳油 4.3% chlorofluoroem- emamectin benzoate EC	1 125	7.10±0.08 a	14.66±0.92 d
2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂 2.5% lambda-cyhalothrin EW	1 000	6.51±0.17 b	21.33±1.29 c
1.8%阿维菌素乳油 1.8% abamectin EC	2 500	6.13±0.19 b	25.84±2.00 b
0.3%苦参碱水剂 0.3% matrine AS	600	5.63±0.07 c	32.32±1.53 a
对照 CK	—	7.10±0.08 a	—

表中数据为平均数±标准误。同列后不同小写字母表示不同处理间经Duncan氏新复极差法检验差异显著( $P<0.05$ )。Data in the table are means±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments by Duncan's new multiple range test ( $P<0.05$ ).

表6 大球盖菇中药剂残留检测结果

Table 6 Results of pesticide residue analysis of *Stropharia rugosoannulata*

检测项目 Test item	检测结果 Test result/(mg/kg)	检测依据 Test method
高效氯氟氰菊酯 Lambda-cyhalothrin	未检出(检测限0.000 5) Not detected (detection limit 0.000 5)	《蔬菜和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留的测定》(NY/T 761—2008) Determination of multi-residues of organophosphorus, organochlorine, pyrethroid and carbamate pesticides in vegetables and fruits (NY/T 761—2008)
高效氯氟菊酯 Beta-cypermethrin	未检出(定量限0.003) Not detected (detection limit 0.003)	《蔬菜和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留的测定》(NY/T 761—2008) Determination of multi-residues of organophosphorus, organochlorine, pyrethroid and carbamate pesticides in vegetables and fruits (NY/T 761—2008)
甲氨基阿维菌素 苯甲酸盐 Emamectin benzoate	未检出(检测限0.000 08) Not detected (detection limit 0.000 08)	《水果和蔬菜中450种农药及相关化学品残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》(GB/T 20769—2008) Determination of residues of 450 pesticides and related chemicals in fruits and vegetables: liquid chromatography-tandem mass spectrometry method (GB/T 20769—2008)
阿维菌素 Abamectin	未检出(检测限0.01) Not detected (detection limit 0.01)	《食品安全国家标准 水果和蔬菜中阿维菌素残留量的测定 液相色谱法》(GB 23200.19—2016) National food safety standard - determination of abamectin residue in fruits and vegetables: liquid chromatography method (GB 23200.19—2016)

### 3 讨论

随着人们对食用菌产量和品质要求的不断提升,菌种筛选、外源营养袋配制及栽培管理等关键环节也受到了越来越多的关注与重视。然而,在食用菌栽培过程中,部分菌种直接播种于土壤中,其菌丝及子实体易受到土壤有害生物的为害(林金盛等, 2020)。跳虫是土壤中一种节肢类动物,种类丰富、数量繁多,能为害多种食用菌。本研究调查了大球盖菇生长初期大棚内跳虫的为害情况,结果表明,3个大球盖菇大棚土壤中跳虫平均密度为 $7.15 \times 10^4$ 头/ $m^2$ ,跳虫对大球盖菇子实体的平均为害率达60%。这与已有文献报道基本一致,如杨析(2023)调查发现,黄土高原草地土壤动物在凋落物层至30 cm土层深度范围内的平均密度达20 732头/ $m^2$ ;李进(2019)通过调查云南省兰坪县铅锌矿区周边的农田发现土壤中跳虫的平均密度为12 042头/ $m^2$ 。这些研究均表明,跳虫在土壤中的种群密度较高,可能与其生态习性和环境条件密切相关。跳虫数量大,为害严重,推测可能是在大球盖菇种植过程中,基地内清洁不到位,如木屑等原材料堆积,为跳虫的生长繁殖提供了场所。此外,跳虫的弹跳能力使其能够快速扩散,进一步加剧了为害程度(Fiera et al., 2020; Zhang et al., 2023)。

本研究发现跳虫在土壤中呈现均匀分布,可能是大棚内大球盖菇长势均衡、分布均匀,且通过智能喷灌系统使大棚内各位置的湿度保持相对稳定的原因,并且均匀分布的跳虫种群可能更易于扩散和传播,从而加剧对大球盖菇的为害。该结果与马辰(2019)研究结果不同土壤跳虫种类分布较均匀的结论一致。

本研究通过室内外防治跳虫的药剂筛选和对比试验,评估了10种杀虫剂对跳虫的防治效果,结果表明,4.3%氯氟·甲维盐乳油和1.8%阿维菌素乳油的防治效果最佳,其次是4.5%高效氯氟菊酯乳油、0.3%苦参碱水剂和2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂,这些药剂均能有效防治跳虫。刘棋等(2020)研究表明4.5%高效氯氟菊酯乳油对棘跳虫 *Thalassaphorura orientalis* 表现出优良的持效性和防治效果,持效期可达14 d以上,本研究结果与其类似。本研究还发现,4.5%高效氯氟菊酯乳油对大球盖菇菌丝生长的抑制率最低,为13.16%;4.3%氯氟·甲维盐乳油对菌丝生长的抑制率次之,为14.66%;2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂、20%甲氰菊酯乳油、1.8%阿维菌素乳油这3种药剂会抑制菌丝生长,但是抑菌率

均低于30%。林金盛等(2020)研究发现,2.5%高效氯氟氰菊酯微乳剂对跳虫的杀虫活性较好,且其对羊肚菌 *Morchella esculenta* 菌丝生长的抑制作用较弱,表明其在食用菌栽培中具有较高的应用潜力。闻亚美等(2020)进一步证实,高效氯氟菊酯对平菇 *Pleurotus ostreatus* 菌丝生长速度的影响较小,适合在平菇栽培中使用。此外,李佳颖等(2023)研究发现甲维盐对球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 菌落生长的影响与对照组相比差异不显著,表明其对非靶标微生物的安全性较高,本试验结论与以上研究结果基本一致。

目前,化学药剂仍是防治食用菌跳虫的主要手段,但食用菌的药剂残留问题也较严重。本研究对4.5%高效氯氟菊酯乳油、2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂、4.3%氯氟·甲维盐乳油、20%甲氰菊酯乳油、1.8%阿维菌素乳油5种药剂进行残留检测,结果表明,除20%甲氰菊酯乳油外,其他4种药剂在大球盖菇中均未检测出残留。这与许多研究结果相似,如孙立娟等(2008)通过测定阿维菌素在食用菌中的残留量,发现其残留水平完全符合农药残留分析的要求,进一步证实了阿维菌素的安全性。闻亚美等(2020)发现高效氯氟菊酯对平菇的安全性较高,未对食用菌品质造成显著影响。然而,20%甲氰菊酯乳油的残留问题需引起重视,在实际使用中需严格控制施药剂量和次数,以避免残留超标对食用菌产品安全性的潜在威胁。

总之,本研究筛选出的4.3%氯氟·甲维盐乳油、4.5%高效氯氟菊酯乳油、2.5%高效氯氟氰菊酯水乳剂、1.8%阿维菌素乳油这4种药剂可作为防治跳虫的优选药剂,这些药剂不仅对跳虫具有显著的防治效果,而且对大球盖菇菌丝生长的抑制率较低,同时在农药残留检测中未检出残留,符合食用菌安全生产的要求。在实际应用中,除使用这些药剂外,还应注重种植基地清洁管控,结合物理与化学防治方法,保障食用菌产量与品质。

### 参 考 文 献 (References)

- Chen W, Chen X, Li J, Ma XR, Cui W, Qu FT, Xie GL, Zhao HQ. 2020. Diversity analysis and function prediction of gut microbiota in three springtail species. *Acta Entomologica Sinica*, 63(4): 450–461 (in Chinese) [陈伟, 陈霞, 李娟, 马欣然, 崔薇, 渠凤甜, 谢桂林, 赵红庆. 2020. 三种跳虫肠道菌群的多样性分析及功能预测. *昆虫学报*, 63(4): 450–461]
- Deng ZY, Lu Q, Xue SJ, Yang D, Ma J. 2025. Structural and functional characterization of dietary fibers from *Stropharia rugosoannulata*.

- Science and Technology of Food Industry, 46(18): 82–92 (in Chinese) [邓仔云, 卢琪, 薛淑静, 杨德, 马静. 2025. 大球盖菇膳食纤维的结构特征与功能特性分析. 食品工业科技, 46(18): 82–92]
- Fiera C, Ulrich W, Popescu D, Buchholz J, Querner P, Bunea CI, Strauss P, Bauer T, Kratschmer S, Winter S, et al. 2020. Tillage intensity and herbicide application influence surface-active springtail (Collembola) communities in Romanian vineyards. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 300: 107006
- Guo MP, Ma XL, Zhou Y, Bian YB, Liu GL, Cai YL, Huang TJ, Dong HX, Cai DJ, Wan XJ, et al. 2023. Genome sequencing highlights the plant cell wall degrading capacity of edible mushroom *Stropharia rugosoannulata*. *Journal of Microbiology*, 61(1): 83–93
- Jia SB, Yue LR, Chen JX. 2009. Introduction to classification of jumping insects. *Bulletin of Biology*, 44(10): 21–22 (in Chinese) [贾少波, 岳丽蕊, 陈建秀. 2009. 跳虫分类简介. 生物学通报, 44(10): 21–22]
- Jiang TT, Liu B, Gong HH, Li ZL, Yao XH, Huo X. 2023. Effect of repellent color on control mosquito and fly pests in *Pleurotus ostreatus* production. *Journal of Environmental Entomology*, 45(3): 807–814 (in Chinese) [姜婷婷, 刘斌, 官海华, 李子玲, 姚晓华, 霍行. 2023. 驱避色防治平菇蚊、蝇类害虫的效果评价. 环境昆虫学报, 45(3): 807–814]
- Li C, Wang ML, Liu Y, Li Y, Liu XH, Zhang WJ, Liu ZT, Dong Y. 2024. Analysis of the research status and development prospect of *Stropharia rugosoannulata* in northern China. *Edible Fungi of China*, 43(6): 121–125 (in Chinese) [李超, 王民乐, 刘源, 李岩, 刘小花, 张文杰, 刘志泰, 董岩. 2024. 大球盖菇研究现状及在北方地区的发展前景分析. 中国食用菌, 43(6): 121–125]
- Li J. 2019. Toxicological study on response of different biological level characteristics of collembolan (Collembola) to heavy metals in farmland and antibiotics pollution. Master thesis. Shanghai: East China Normal University (in Chinese) [李进. 2019. 跳虫(弹尾纲)不同生物水平特征对农田重金属和抗生素类污染响应的毒理学研究. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学]
- Li JY, Xiao ZP, Zhang S, Cai HL, Teng K, Zeng WA, Wu SL, Zhou XP. 2023. Synergistic Interaction between the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* SCAUJH19 and emamectin benzoate against *Spodoptera litura*. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 42(2): 8–16 (in Chinese) [李佳颖, 肖志鹏, 张慎, 蔡海林, 滕凯, 曾维爱, 伍绍龙, 周向平. 2023. 球孢白僵菌 SCAUJH19 和甲维盐对斜纹夜蛾的协同作用及制剂研究. 山地农业生物学报, 42(2): 8–16]
- Li XF, Huang HZ, Zhang WJ, Wang CJ. 2000. Determining the susceptibility of *L. sativae* and *L. huidobrensis* to three classes of pesticides. *Journal of Plant Protection*, 27(2): 179–182 (in Chinese) [李学锋, 黄华章, 张文吉, 王成菊. 2000. 美洲斑潜蝇和拉美斑潜蝇对三类药剂的敏感性测定. 植物保护学报, 27(2): 179–182]
- Li YP, Sun LJ, Liu YJ, Hu Y, Wu JX. 2009. Effects of eight insecticides on *Scatopse* sp. and their residue analysis in edible fungi. *Journal of Plant Protection*, 36(3): 261–267 (in Chinese) [李怡萍, 孙立娟, 刘亚娟, 胡煜, 仵均祥. 2009. 八种杀虫剂对黑粪蚊的防治效果及残留分析. 植物保护学报, 36(3): 261–267]
- Lin JS, Luo X, Qu SX, Jiang N, Hou LJ, Li HP, Ma L. 2020. Identification of springtail pests on *Morchella* and insecticides selection. *Plant Protection*, 46(5): 174–180 (in Chinese) [林金盛, 骆昕, 曲绍轩, 蒋宁, 侯立娟, 李辉平, 马林. 2020. 羊肚菌重要害虫跳虫的鉴定与防治药剂的筛选. 植物保护, 46(5): 174–180]
- Liu Q, Dong JC, Cheng WZ, Bai RX, Shen K, Jiang ZL. 2020. Field control efficacies of eight pesticides to *Tetranychus cinnabarinus* and *Hypogastrura communis* on *Bletilla striata*. *Plant Protection*, 46(2): 276–280, 286 (in Chinese) [刘棋, 董竞成, 成文章, 拜如霞, 申科, 蒋智林. 2020. 8种药剂对紫花三叉白及主要害虫的田间防治效果. 植物保护, 46(2): 276–280, 286]
- Luo Q, Guo T, Sun ZX, Yu DL, Yu ZH. 2023. Biological basis and bioactive components of *Stropharia rugosoannulata* and its application. *Microbiology China*, 50(6): 2709–2720 (in Chinese) [骆庆, 郭涛, 孙召新, 余大龙, 余知和. 2023. 大球盖菇的生物学基础、活性成分及其应用. 微生物学通报, 50(6): 2709–2720]
- Ma C. 2019. The responses of soil collembolans' distribution pattern to environmental changes in the forests of Changbai mountains. PhD thesis. Changchun: Northeast Normal University (in Chinese) [马辰. 2019. 长白山地森林土壤跳虫的分布格局及其对环境变化的响应. 博士学位论文. 长春: 东北师范大学]
- Ma L, Gu LT, Qu SX, Lin JS, Hou LJ, Li HP, Jiang N, Xu P. 2024. Research progress on pest control of edible fungi. *Journal of Environmental Entomology*, 46(2): 332–340 (in Chinese) [马林, 顾鲁同, 曲绍轩, 林金盛, 侯立娟, 李辉平, 蒋宁, 徐平. 2024. 食用菌虫害防控研究进展. 环境昆虫学报, 46(2): 332–340]
- Mo YW, Lin HY, Zheng MQ, Wang H, Yang G, Wang W. 2019. Isolation, identification, physicochemical parameters and antibacterial characteristics of *Byssoschlamys* sp. from Shengzhou nane (*Prunus salicina* var. *taoxingli*) fruit. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 27(12): 2227–2237 (in Chinese) [莫亿伟, 林海雁, 郑梦琪, 王海, 杨国, 王伟. 2019. 桃形李果实丝衣霉菌的分离、鉴定、生物学特性及其防治. 农业生物技术学报, 27(12): 2227–2237]
- Sun LJ, Li YP, Hu Y, Cheng WN, Wu JX. 2008. Preliminary investigation on edible fungi pests in Yangling and its near areas of Shaanxi. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 17(1): 110–112 (in Chinese) [孙立娟, 李怡萍, 胡煜, 成卫宁, 仵均祥. 2008. 杨凌及其周边地区食用菌害虫初步调查研究. 西北农业学报, 17(1): 110–112]
- Wang W, Zhang RF, Liu HY, Zhang Y, Yao J. 2016. Spatial distribution pattern of common meadow bug *Lygus pratensis* (Linnaeus) in Xinjiang cotton fields. *Journal of Plant Protection*, 43(6): 972–978 (in Chinese) [王伟, 张仁福, 刘海洋, 张瑜, 姚举. 2016. 新疆棉田牧草盲蝽的空间分布规律. 植物保护学报, 43(6): 972–978]
- Wang XK, Shi QQ, Deng DL, Pu SY. 2018. Review on toxicology of nanomaterials based on soil model organisms. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 13(3): 31–41 (in Chinese) [王晓科, 石清清, 邓代莉, 蒲生彦. 2018. 基于土壤模式生物的纳米材料毒理学研究进展. 生态毒理学报, 13(3): 31–41]
- Wei W, Yang MF, Liao QR, Yang H, Cheng WL. 2013. The spatial distribution patterns and sampling technique of *Lissorhoptrus oryzophilus* larvae under two seedling-raising methods. *Journal of*

- Plant Protection, 40(2): 128–132 (in Chinese) [嵇薇, 杨茂发, 廖启荣, 杨洪, 陈文龙. 2013. 两种育秧方式下水稻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]
- Wen YM, Ding YT, Zhang H, Dang S, Huang TG. 2020. Safety evaluation of beta-cypermethrin in the cultivation of *Pleurotus ostreatus* on sterilized substrate. *Edible Fungi of China*, 39(8): 79–81, 85 (in Chinese) [闻亚美, 丁亚通, 张辉, 党帅, 黄桃阁. 2020. 高效氯氰菊酯在平菇熟料栽培中的安全性评价. 中国食用菌, 39(8): 79–81, 85]
- Xu Q, Wang BF, Wu DH, Du J, Liu YL, Chang L. 2024. Light pollution increased night-active but not day-active Collembola in Hulunbuir Grassland, China. *Applied Soil Ecology*, 197: 105329
- Yan HJ, Liu XJ. 2012. Research progress on ecotoxicology of pesticides to soil Collembola. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 40(12): 6–9, 92 (in Chinese) [严海娟, 刘贤进. 2012. 农药对土壤跳虫的生态毒理学研究进展. 江苏农业科学, 40(12): 6–9, 92]
- Yang K. 2017. The research on determination methods of pesticide multi-residues and the degradation dynamics in bitter melon and cucumber. Master thesis. Nanning: Guangxi University (in Chinese) [杨珂. 2017. 苦瓜和黄瓜中农药多残留检测方法及几种杀菌剂残留消解动态研究. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学]
- Yang X. 2023. Geographic distribution of grassland soil fauna and their ecological functions on the Loess Plateau. PhD thesis. Yangling: Northwest A & F University (in Chinese) [杨析. 2023. 黄土高原草地土壤动物地理分布及其生态功能研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Zhang B, Hao J, Sun Z, Zhao XM, Zhang J, Ma ZQ. 2023. Non-food bioactive products for botanical pesticides: insights into residue and dissipation kinetics of matrine-type alkaloids from *Sophora alopecuroides*. *Industrial Crops and Products*, 192: 116032
- Zhao Y, Zhang YP, Jia SB, Zhang JJ. 2011. Selection and optimization of culture bottle and culture medium for jumping insects. *Hunan Agricultural Sciences*, (1): 89–90, 93 (in Chinese) [赵岩, 张玉平, 贾少波, 张俊景. 2011. 跳虫培养瓶和培养基的选用及优化. 湖南农业科学, (1): 89–90, 93]
- Zhou HB, Chen L, Chen JL, Cheng DF, Liu Y, Sun JR. 2009. Effect of intercropping between wheat and pea on spatial distribution of *Sitobion avenae* based on GIS. *Scientia Agricultura Sinica*, 42(11): 3904–3913 (in Chinese) [周海波, 陈林, 陈巨莲, 程登发, 刘勇, 孙京瑞. 2009. 基于GIS的小麦-豌豆间作对麦长管蚜种群空间格局的影响. 中国农业科学, 42(11): 3904–3913]
- Zhu FC. 2017. Occurrence regularity and integrated control techniques of edible fungi jumping. *Edible Fungi*, 39(6): 71–72 (in Chinese) [朱富春. 2017. 食用菌跳虫发生规律及综合防治技术. 食用菌, 39(6): 71–72]

(责任编辑:王璇)