羊肚菌重要害虫跳虫的鉴定与防治药剂的筛选

林金盛， 骆 昕， 曲绍轩， 蒋 宁， 侯立娟， 李辉平， 马 林*

（江苏省农业科学院蔬菜研究所，江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室，南京 210014）

摘要 为了明确为害栽培羊肚菌的跳虫种类，筛选对跳虫杀虫效果明显且对羊肚菌菌丝生长影响较小的杀虫剂，通过*CO*Ⅰ基因片段系统进化分析对不同地区羊肚菌上的跳虫进行分类，结果显示四川成都和河南驻马店虫样属长角跳科，四川金堂虫样属棘跳科，四川泸定和河南郑州虫样属球角跳科。采用菇片浸渍法和药膜法测定了9种杀虫剂对跳虫的杀虫活性，2.5%高效氯氟氰菊酯ME、10%吡虫啉WP和0.5%苦参碱EW的LC_{50}在10 mg/L以下，杀虫活性最好；其次为10%烯啶虫胺EW、25%噻虫嗪WP。采用平皿菌丝生长速率法测定了9种杀虫剂对羊肚菌菌丝生长的影响，10%吡虫啉WP对菌丝的抑制作用最小，EC_{50}为707.353 mg/L；其次为45%马拉硫磷EC、10%烯啶虫胺EW、150 g/L茚虫威SC、25%吡蚜酮SC和2.5%高效氯氟氰菊酯ME。基于杀虫活性和对羊肚菌的安全性评价综合考虑，吡虫啉为最佳选择，其次为烯啶虫胺和茚虫威。

关键词 羊肚菌； 跳虫； 鉴定； 杀虫活性

中图分类号： S 436.462 **文献标识码：** A **DOI：** 10.16688/j.zwbh.2019360

Identification of springtail pests on *Morchella* and insecticides selection

LIN Jinsheng， LUO Xin， QU Shaoxuan， JIANG Ning， HOU Lijuan， LI Huiping， MA Lin*

(*Vegetable Research Institute*, *Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement*, *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract In order to identify the springtails damaged *Morchella* spp., and select effective insecticides with obvious insecticidal activity and less impact on the mycelium growth of *Morchella*, the springtail samples collected from different cities were identified through phylogenetic analysis of *CO*Ⅰ gene. The results showed that samples from Chengdu, Sichuan and Zhumadian, Henan belonged to Entomobryidae, from Jintang, Sichuan belonged to Onychiuridae, from Luding, Sichuan and Zhengzhou, Henan belonged to Hypogastruridae. The insecticidal activities of nine insecticides against springtails were determined by the method of mushroom-dipping and residual film in glass tube. *Lambda*-cyhalothrin 2.5% ME, imidacloprid 10% WP and matrine 0.5% EW showed the best insecticidal effects (LC_{50}<10 mg/L). The insecticidal activities of nitenpyram 10% EW, thiamethoxam 25% WP were lower than the above three insecticides. The effects of nine insecticides on mycelium growth of *M. esculenta* were measured by plate bioassays. Imidacloprid 10% WP displayed the lowest inhibitory effect on mycelium growth with the EC_{50} value of 707.353 mg/L. The antifungal activities of malathion 45% EC, nitenpyram 10% EW, indoxacarb 150 g/L SC, pymetrozine 25% SC and *lambda*-cyhalothrin 2.5% ME were higher than imidacloprid 10% WP. Therefore, based on the comprehensive evaluation of insecticidal effect and safety evaluation, imidacloprid is the best candidate, followed by nitenpyram and indoxacarb.

Key words *Morchella* spp.; springtail; identification; insecticidal activity

羊肚菌 *Morchella* spp. 因其羊肚状菌盖而得名[1]，属子囊菌亚门 Ascomycotina，盘菌纲 Pezizomycetes，盘菌目 Pezizales，羊肚菌科 Morchellaceae[2]，是一类世界分布的名贵食用菌[3]。羊肚菌含有丰富的氨基酸、多糖、维生素与微量元素等营养成分，具有很高的营养和药用价值[4]，开发利用前景广阔。近

收稿日期： 2019－07－16 **修订日期：** 2019－10－06
基金项目： 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-20)
* 通信作者 E-mail：malin1590@sina.com

年来中国的羊肚菌在人工栽培上取得了长足进展,并于 2012 年开始商业化生产。2017 年国内羊肚菌的人工栽培面积已达到 4 666 hm^2,栽培范围遍布全国[5]。但在羊肚菌产业迅速扩大的同时,有接近 70%的栽培者因羊肚菌产量的不稳定性而无法稳定盈利[6],因而影响了羊肚菌产业的健康和稳定发展。羊肚菌栽培的不稳定因素源自其对生长环境要求较高,基础生物学研究薄弱,此外,跳虫、螨类等多种害虫对羊肚菌菌丝和子实体的为害也是造成其减产的重要原因之一[7]。

跳虫 Collembolans 是节肢动物门 Arthropoda 中一个古老的动物类群,隶属六足亚门 Hexapoda,弹尾纲 Collembola[8],是土壤生态系统的三大土壤动物类群之一。跳虫一般生活在潮湿场所,以动植物残体、腐殖质、细菌、真菌及藻类为主要食物,取食孢子、发芽植物的种子、花粉、活植物的组织[9]。由于跳虫个体较小,很难发现,且羊肚菌目前的栽培模式无法对培养基质提前进行灭菌杀虫,使得跳虫成为制约羊肚菌生产的重要害虫之一,严重影响食用菌的产量及商品价值。

目前国内对羊肚菌上跳虫种类和防治研究较少,且尚无杀虫剂登记用于防治跳虫。因此,本研究对四川、河南羊肚菌出菇大棚采集的跳虫进行分类鉴定,选择多种不同作用方式的低毒杀虫剂进行杀虫试验和对羊肚菌菌丝生长影响试验,以期明确国内羊肚菌主产地出现的跳虫种类,筛选适宜在羊肚菌栽培中使用的防治跳虫杀虫剂,为合理使用杀虫剂提供依据,对羊肚菌的安全生产具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　跳虫采集与鉴定

虫样采集:在四川、河南不同地点的羊肚菌栽培基地采集跳虫,在每一基地羊肚菌子实体和营养袋上随机采集活跃的跳虫,浸泡于装有 1 mL 75%乙醇的离心管中保存。

形态特征鉴定:以观察成虫特征为主。将采集的虫样按 Nesbitt's fluid 法制片后在显微镜下观察,主要观察成虫头部、胸部和腹部上的关键部位,参考跳虫分类鉴定相关文献[8,10]和 http://www.collembola.org/的分类描述,将虫样鉴定到科。

分子生物学鉴定:取单只虫样头部于 1.5 mL 离心管中,用 T5 Direct PCR Kit (Animal Tissue)中的加热裂解法扩增线粒体 *CO* Ⅰ基因片段,正向引物为 COF14 (5′-GGTCAACAAATCATAAAGATATTGG-3′),反向引物为 COR72(5′-TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAATC-3′)[11]。PCR 反应体系(25 μL)为:T5 Mix 12.5 μL,正、反向引物(10 pmol/μL)各 1 μL,头部裂解液 1 μL,超纯水 9.5 μL。PCR 反应程序为 98℃ 3 min;98℃ 10 s,47℃ 10 s,72℃ 30 s,35 个循环;72℃ 5 min。扩增产物由擎科生物工程(南京)股份有限公司进行测序,测序结果在 NCBI 上 BLAST 初步确认虫样分类学地位。以食用菌栽培中常见害虫异迟眼蕈蚊 *Bradysia impatiens* 为外群种类,用 MEGA 6.0 软件 Maximum Likelihood 法构建系统进化树。用 Jukes-Cantor model 计算基因的遗传距离,自展分析重复 1 000 次。

1.2　杀虫剂活性测定

1.2.1　供试杀虫剂

2.5%高效氯氟氰菊酯微乳剂(ME),江苏辉丰生物农业股份有限公司;45%马拉硫磷乳油(EC),宁波三江益农化学有限公司;10%烯啶虫胺水乳剂(EW),江苏明德立达作物科技有限公司;150 g/L 茚虫威悬浮剂(SC),宁波三江益农化学有限公司;0.5%苦参碱水乳剂(EW),江苏南通神雨绿色药业有限公司;25%吡蚜酮悬乳剂(SC),江苏云帆化工有限公司;10%吡虫啉可湿性粉剂(WP),宁波三江益农化学有限公司;25%噻虫嗪可湿性粉剂(WP),江苏扬州市苏灵农药化工有限公司和 25%噻嗪酮可湿性粉剂(WP),江苏辉丰生物农业股份有限公司。

1.2.2　供试跳虫和羊肚菌

跳虫 *Ceratophysella* sp. 采自四川省泸定县羊肚菌出菇大棚。羊肚菌 *Morehella esculenta* 为江苏省农业科学院蔬菜研究所食用菌研究室保存菌株。

1.2.3　9 种杀虫剂对跳虫的室内毒力测定

供试杀虫剂中多数同时具有触杀和胃毒作用。故采用菇片浸渍法[12]和药膜法[13]相结合的方法测定 9 种杀虫剂对跳虫的杀虫活性。将 9 种供试药剂分别用水稀释成 5 个浓度,使成虫死亡率均匀分布在 20%～90%之间。将新鲜羊肚菌切成边长为

1 cm的正方形，放入药液中浸渍 10 s 后，取出吸去表面残留药液；同时，用移液器量取同种药液 5 mL 倒入 10 mL 无盖离心管（直径 15 mm 高 80 mm）中振荡，使药液充分接触离心管内壁后用移液器吸出剩余药液，离心管自然风干。随后将带药菇片放入带药离心管中，接入跳虫 30 头，以 60 目防虫网封口，清水为对照，每处理 3 次重复。将离心管在 20℃条件下静置，24 h 后检查试虫死亡情况，分别记录总虫数和死虫数。利用 SPSS 20.0 软件求得 b 值 ± 标准误差、LC_{50}、95% 置信限、卡方值和 P 值[14]。

1.2.4 9 种杀虫剂对羊肚菌菌丝生长的影响

采用平皿菌丝生长速率法[15]进行测定。将9 种供试药剂分别用无菌水稀释成 5 个浓度，使菌丝抑制率均匀分布在 20%～90%之间。在无菌条件下，将药剂稀释液分别与 PDA 培养基按体积比 1∶9的比例混合。待培养基凝固后，将直径 7 mm 的羊肚菌菌饼接种于含药平板中央，菌丝面朝上，盖上皿盖。以加入等量无菌水的培养基作为空白对照。每处理 3 次重复。在 25℃条件下恒温培养，当对照菌丝快要长满全皿时，用十字交叉法测量菌落直径，计算各处理对菌丝生长的抑菌率。利用 SPSS 20.0 软件求得 b 值±标准误差、EC_{50}、95%置信限、卡方值和 P 值。

2 结果与分析

2.1 跳虫的鉴定

2.1.1 形态学鉴定

跳虫为害栽培羊肚菌的菌丝和子实体，如图 1 所示。在四川省成都市、泸定县、金堂县和河南省驻马店市、郑州市羊肚菌基地采集跳虫虫样 7 份（2018 年 5 份，2019 年 2 份）。通过与已报道跳虫形态学分类特征进行比对，结果如表 1 所示。7 个虫样分属 3 个科，成都和驻马店虫样同属长角跳科 Entomobryidae，金堂虫样属棘跳科 Onychiuridae，泸定和郑州虫样属球角跳科 Hypogastruridae。同一地点不同年份采集虫样种类一致。

左图为金堂跳虫为害羊肚菌子实体，右图为郑州跳虫为害羊肚菌菌丝
Left: Springtails damaged the fruiting of *M. esculenta* in Jintang. Right: Springtails damaged the mycelium of *M. esculenta* in Zhengzhou

图 1 跳虫在羊肚菌上的为害状

Fig. 1 Symptoms on *Morchella esculenta* damaged by springtails

表 1 跳虫形态学鉴定结果

Table 1 Morphological identification results of springtails

采集时间/年 Collecting time	采集地点 Collecting location	鉴定结果（科） Identification(Family)	形态学特征 Morphological character
2018	四川成都 河南驻马店	长角跳科 Entomobryidae	体毛纤毛状，前胸背板退化，无刚毛；上颚存在但退化，无臼齿部；下颚柄与喙基之间无特别的轴节；弹器端节常有三骨片结构
2018，2019	四川金堂	棘跳科 Onychiuridae	弹器齿节消失或退化，无环；触角第Ⅳ节末端的顶器消失；触角第Ⅲ节的感觉器官是由 6 部分组成的复合体，包括外部 4 个乳突及内部 2 个感觉结构；伪单眼在触角的基部
2018，2019 2018	四川泸定 河南郑州	球角跳科 Hypogastruridae	腹部无侧突；具上颚且有臼齿部；有眼和弹器；角后器缺乏；腹部半卵圆形，腹部第Ⅵ节短于第Ⅴ节

2.1.2 分子生物学鉴定

通过对 7 份虫样 *CO*Ⅰ基因片段进行 PCR 扩增，获得的 *CO*Ⅰ基因片段长度分别为 648 bp（2018-Chengdu）、651 bp（2018-Luding）、644 bp（2019-Luding）、664 bp（2018-Jintang）、651 bp（2019-Jintang）、634 bp（2018-Zhengzhou）和 667 bp（2018-Zhumadian）。通过在 NCBI 上进行 BLAST，构建系统进化树如图 2 所示，成都虫样（2018-Chengdu）与 *Homidia tiantaiensis*（KJ873727.1）同源性高达 100%，驻马店虫样（2018-Zhumadian）与 *Entomobryoides dissimilis*（KM610126.1）的同源性为 85.44%，金堂虫样（2018-Jintang、2019-Jintang）与 *Protaphorura maoerensis*（KU508167.1）的同源性为 83.93%和 85.34%，泸定和郑州虫样（2018-Lu-

ding、2019-Luding、2018-Zhengzhou)与 *Ceratophysella denisana* (LC222045.1)的同源性分别为 83.73%、83.84%和 83.25%。由于虫样 *CO* Ⅰ基因片段序列与 NCBI 上已公布序列同源性多在 80%以上,只能初步认定虫样分属 *Homidia*、*Entomobryoides*、*Protaphorura* 和 *Ceratophysella* 4 个属。

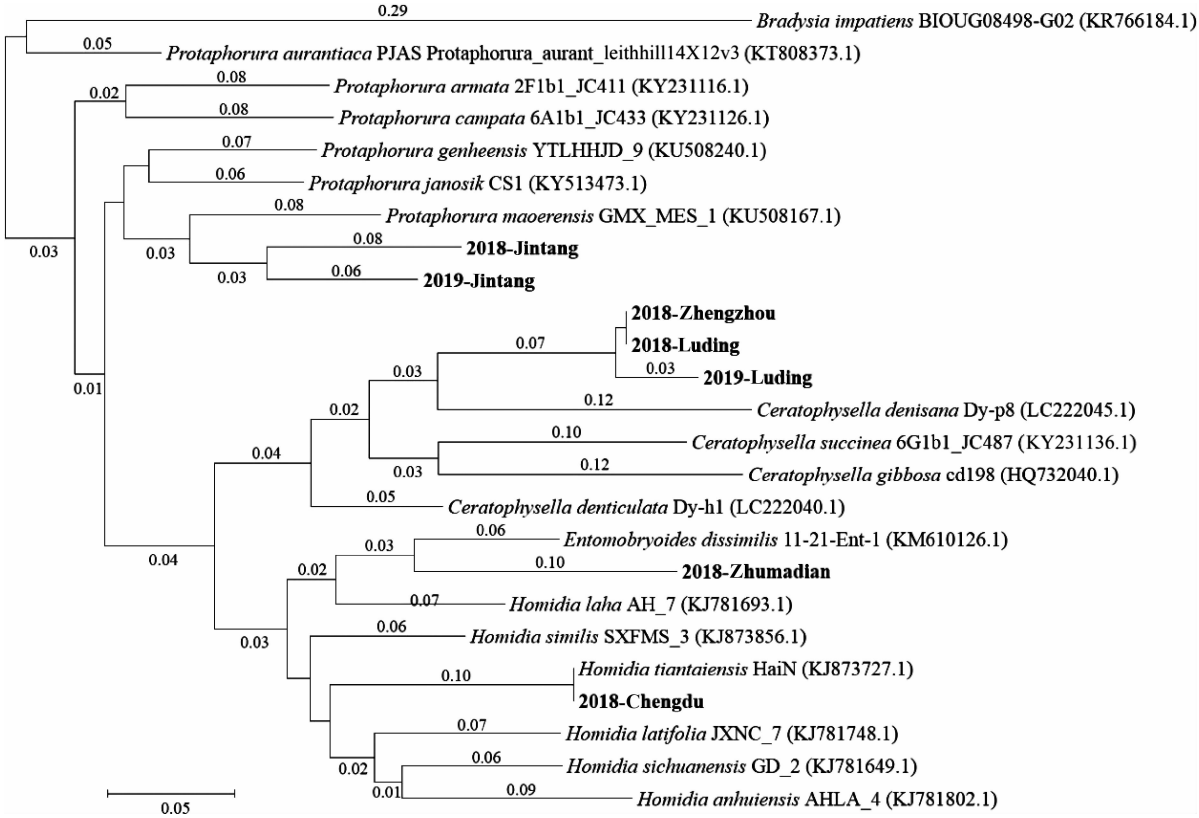

图 2　基于 *CO* Ⅰ基因的羊肚菌跳虫系统进化树

Fig. 2　Phylogenetic tree of springtails on *Morchella esculenta* based on *CO* Ⅰ gene

2.2　9 种杀虫剂对跳虫的室内毒力测定

以在泸定县对羊肚菌为害严重的跳虫 *Ceratophysella* sp. 为试虫,采用胃毒和触杀结合的方法开展了 9 种杀虫剂的室内毒力测定,结果如表 2 所示。9 种杀虫剂对跳虫均有一定的杀虫活性,其中 2.5%高效氯氟氰菊酯 ME、10%吡虫啉 WP 和 0.5%苦参碱 EW 对跳虫的 LC_{50} 在 10 mg/L 以下,杀虫活性最好;其次为 10%烯啶虫胺 EW、25%噻虫嗪 WP,LC_{50} 在 10～30 mg/L 之间;150 g/L 茚虫威 SC、45%马拉硫磷 EC、25%吡蚜酮 SC 和 25%噻嗪酮 WP 的杀虫活性较差,LC_{50} 高于 30 mg/L。

表 2　9 种杀虫剂对跳虫的室内毒力测定

Table 2　Toxicity of nine kinds of insecticides to *Ceratophysella* sp.

药剂 Insecticide	浓度/mg·L^{-1} Concentration	b 值±标准误 b±SE	LC_{50}/mg·L^{-1}	95%置信限/mg·L^{-1} 95% confidence limit	χ^2 (df=3)	P
2.5%高效氯氟氰菊酯 ME *lambda*-cyhalothrin 2.5% ME	100, 10, 1, 0.5, 0.1	0.852±0.133	1.144	0.587～2.162	0.952	0.813
45%马拉硫磷 EC malathion 45% EC	200, 100, 50, 25, 12.5	1.521±0.285	38.725	27.594～62.954	0.132	0.988
10%烯啶虫胺 EW nitenpyram 10% EW	80, 40, 20, 10, 5	1.915±0.296	19.458	14.633～25.795	0.141	0.986
150 g/L 茚虫威 SC indoxacarb 150 g/L SC	80, 40, 20, 10, 5	1.847±0.296	36.668	26.619～48.609	0.554	0.907
0.5%苦参碱 EW matrine 0.5% EW	20, 10, 5, 2.5, 1.25	1.745±0.285	5.276	3.896～7.210	0.262	0.967

续表 2 Table 2(Continued)

药剂 Insecticide	浓度/mg·L^{-1} Concentration	b 值±标准误差 b±SE	LC_{50}/mg·L^{-1}	95%置信限/mg·L^{-1} 95% confidence limit	χ^2 (df=3)	P
25%吡蚜酮 SC pymetrozine 25% SC	200, 100, 50, 25, 12.5	1.698±0.286	37.924	26.896～51.321	0.873	0.832
10%吡虫啉 WP imidacloprid 10% WP	100, 10, 1, 0.5, 0.1	0.734±0.120	1.605	0.767～3.334	0.560	0.906
25%噻虫嗪 WP thiamethoxam 25% WP	80, 40, 20, 10, 5	1.566±0.276	22.930	16.512～32.753	0.342	0.952
25%噻嗪酮 WP buprofezin 25% WP	200, 100, 50, 25, 12.5	1.387±0.269	64.355	44.849～98.502	0.428	0.934

2.3 9 种杀虫剂对羊肚菌菌丝生长的影响

采用菌丝生长速率法测定了 9 种杀虫剂对羊肚菌菌丝生长速率的影响，结果如表 3 所示。9 种杀虫剂对羊肚菌菌丝有不同程度的抑制作用，其中 10%吡虫啉 WP 对菌丝的抑制作用最小，EC_{50} 为 707.353 mg/L；其次为 45%马拉硫磷 EC、10%烯啶虫胺 EW、150 g/L 茚虫威 SC、25%吡蚜酮 SC 和 2.5%高效氯氟氰菊酯 ME，EC_{50} 在 100～300 mg/L 之间；25%噻虫嗪 WP、0.5%苦参碱 EW 和 25%噻嗪酮 WP 对菌丝的抑制作用最强，EC_{50} 低于 100 mg/L。结合对跳虫的杀虫作用，9 种杀虫剂中 10%吡虫啉 WP 为最佳选择，其次为 10%烯啶虫胺 EW 和 150 g/L 茚虫威 SC。

表 3 9 种杀虫剂对羊肚菌菌丝的皿内抑制作用

Table 3 Inhibition of nine kinds of insecticides against mycelial growth of *Morchella esculenta*

药剂 Insecticide	浓度/mg·L^{-1} Concentration	b 值±标准误差 b±SE	EC_{50}/mg·L^{-1}	95%置信限/mg·L^{-1} 95% confidence limit	χ^2 (df=3)	P
2.5%高效氯氟氰菊酯 ME *lambda*-cyhalothrin 2.5% ME	400, 200, 100, 50, 25	1.650±0.167	116.101	96.778～140.524	1.232	0.745
45%马拉硫磷 EC malathion 45% EC	500, 250, 125, 62.5, 31.25	1.731±0.187	302.724	247.831～390.090	1.810	0.613
10%烯啶虫胺 EW nitenpyram 10% EW	300, 150, 75, 37.5, 18.75	1.093±0.161	220.151	159.656～358.369	0.405	0.939
150 g/L 茚虫威 SC indoxacarb 150 g/L SC	800, 400, 200, 100, 50	1.092±0.153	206.705	157.832～271.685	0.973	0.808
0.5%苦参碱 EW matrine 0.5% EW	80, 40, 20, 10, 5	1.589±0.167	30.700	25.376～38.133	0.784	0.853
25%吡蚜酮 SC pymetrozine 25% SC	600, 300, 150, 75, 35.5	1.231±0.154	140.010	109.541～177.758	0.178	0.981
10%吡虫啉 WP imidacloprid 10% WP	1 600, 800, 400, 200, 100	1.685±0.174	707.353	587.279～879.591	0.291	0.962
25%噻虫嗪 WP thiamethoxam 25% WP	240, 120, 60, 30, 15	1.763±0.171	77.575	65.292～93.266	0.708	0.871
25%噻嗪酮 WP buprofezin 25% WP	80, 40, 20, 10, 5	2.073±0.181	18.340	15.703～21.353	2.038	0.565

3 讨论

目前国内大面积采用的羊肚菌栽培法是在 Ower[16] 栽培技术的基础上改良的外源营养袋法[17]。羊肚菌菌种直接撒播于土壤中，外源营养袋虽然经高温灭菌，但在使用时需在与土壤接触面开口，使土壤表面的菌丝蔓延至袋内，直至子实体形成前后才撤掉营养袋[17]。在整个栽培过程中，营养丰富的营养袋基质、羊肚菌菌丝和子实体都很难与土壤中的小型动物等隔离开来，且容易成为其食物来源。羊肚菌栽培地多为栽培水稻、小麦或玉米的农田，土壤肥沃，一些以土壤中腐殖质为食、与农作物无直接营养关系、又不捕食害虫的节肢动物群落在农作物收获后依然在土壤中生存，跳虫就是其中非常重要的一类土壤小型节肢动物[18-20]。当农田栽培羊肚菌后，土壤中的跳虫转移至羊肚菌生境，取食其菌丝、子

实体甚至营养袋中的基质,继而生长发育与繁殖。

跳虫能为害黑木耳、糙皮侧耳、双孢蘑菇等多种食用菌[22-23],主要有棘跳科、球角跳科、等节跳科、长角跳科、圆跳科等 5 个科[24]。林善祥等[25]对广东食用菌上跳虫调查时,在蘑菇上发现了球角跳科新种卷毛泡角跳虫 *Ceratophysella flectoseta*,在黑木耳上发现了长角跳科 3 个新种:中华盐长角跳虫 *Salina sinensis* sp. nov.、木耳盐长角跳虫 *Salina auriculae* sp. nov. 和电白长角跳虫 *Entomobrya dianbaiensis* sp. nov.[26]。Weiner 等[27]在中国食用菌上发现了泡角跳属 *Ceratophysella* 的 4 种跳虫,其中包括一个新种 *Ceratophysella skarzynskii* sp. n.。相对于外部形态及内部结构特征,生物的遗传物质具有更大的稳定性,并存在着严格的种间差异[28]。随着分子生物学技术不断更新发展,DNA 分类在动物分类鉴定中的作用越来越大。*CO*Ⅰ基因作为动物鉴定的通用条形码序列被广泛应用于分析亲缘关系较近的种、种下分类单元以及地理种群之间的系统关系[29]。本研究通过跳虫 *CO*Ⅰ基因片段比对发现采集的虫样属于长角跳科、棘跳科和球角跳科 3 个科。后续将结合外部形态特征将虫样进行进一步鉴定。

跳虫作为土壤中分布最广泛的节肢动物之一[30],常作为土壤生态系统健康评价和风险评估的重要指示因子[31]。少数跳虫种类也会为害农作物,但由于并非主要害虫,用于防治的杀虫剂相对较少。陈先玉[32]对为害白菜的棘跳虫进行了 6 种杀虫剂的大田试验,所用杀虫剂对棘跳虫的防治效果均在 95%以上,其中自制 2%鱼藤粉碎浸液和 2%烟碱液具有环保、经济的优点。本研究选择不同类型杀虫剂进行跳虫杀虫试验和菌丝生长安全性试验,结果显示 9 种杀虫剂对跳虫和羊肚菌菌丝表现出不同的杀虫和抑菌活性,其中 10%吡虫啉 WP 对跳虫杀虫活性高且对菌丝影响最小,为最佳选择;10%烯啶虫胺 EW 和 150 g/L 茚虫威 SC 对跳虫杀虫活性和对菌丝影响均为中等。严海娟等[33]测定的吡虫啉对白符跳的 LC_{50} 为 1.86 mg/L,与本试验结果相似(1.605 mg/L)。吡虫啉可有效防治食用菌上的果蝇且对食用菌生长无明显影响[34],按照推荐剂量连续用药 3～4 次后 10 d 残留未超标[35]。烯啶虫胺与吡虫啉同属烟碱类杀虫剂[36],与钠通道抑制剂茚虫威[37]在杀虫作用机制上完全不同。

本研究是在室内得出的杀虫剂对跳虫的杀虫活性以及对羊肚菌菌丝生长的影响,在实际应用中杀虫剂的杀虫效果及对菌丝影响还与用药时期、用药习惯有直接关系。因此在后续试验中将对这 3 种杀虫剂的田间药效、对羊肚菌子实体形成影响和最佳用药时期等内容进行研究,为杀虫剂的合理使用提供理论基础。

参考文献

[1] 李华,包海鹰,李玉. 羊肚菌研究进展[J]. 菌物研究,2004,2(4):53-60.

[2] 倪淑君,张海峰. 我国羊肚菌的产业发展[J]. 北方园艺,2019(2):165-167.

[3] 刘伟,蔡英丽,何培新,等. 梯棱羊肚菌单孢及杂交群体的栽培出菇试验和极性分析[J]. 菌物研究,2019,17(1):43-49.

[4] TIETEL Z, MASAPHY S. True morels (*Morchella*)-nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(11): 1888-1901.

[5] 魏银初,班新河,史红鸽,等. 中原地区羊肚菌保护地栽培技术[J]. 食用菌,2018,40(6):44-46.

[6] 刘伟,张亚,蔡英丽. 我国羊肚菌产业发展的现状及趋势[J]. 食药用菌,2017,25(2):77-83.

[7] 彭卫红,唐杰,何晓兰,等. 四川羊肚菌人工栽培现状的分析[J]. 食药用菌,2016,24(3):145-150.

[8] 贾少波,李朝晖,张玉平,等. 跳虫新分类系统的目科检索[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2010,23(1):38-41.

[9] HOPKIN S P. Biology of the springtails (Insecta: Collembola) [M]. UK: Oxford University Press, 1997: 1-330.

[10] 蔡邦华. 昆虫分类学 [M]. 修订版. 北京:化学工业出版社,2015:52-60.

[11] FOLMER O, BLACK M, HOEH W, et al. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome C oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates [J]. Molecular Marine Biology and Biotechnology, 1994, 3(5): 294-299.

[12] 马林,林金盛,曲绍轩,等. 三种杀虫剂对从南京食用菌大棚随机捕获的 *Bradysia* 的防治效果[J]. 食用菌学报,2017,24(3):87-90.

[13] 郭静静,史雪岩,高希武. 桃蚜对 5 种新烟碱类杀虫剂及氟啶虫胺腈抗性的快速检测方法[J]. 农药学学报,2017,19(5):555-562.

[14] 贾春生. 利用 SPSS 软件计算杀虫剂的 LC_{50}[J]. 昆虫知识,2006,43(3):414-417.

[15] 马林,宋金俤,曲绍轩. 福美双与噻菌灵混配对食用菌木霉和疣孢霉的协同作用[J]. 江苏农业科学,2013,41(8):139-141.

[16] OWER R. Notes on the development of the morel ascocarp: *Morchella esculenta* [J]. Mycologia, 1982: 74(1): 142-144.

[17] 李涛,刘文亮,张广羊,等. 羊肚菌栽培外源营养袋的研究进展[J]. 中国农学通报,2018,34(26):65-69.

[18] 陈影,唐杰,彭卫红,等. 四川羊肚菌高效栽培模式与技术[J]. 食药用菌,2016,24(3):151-154.

[19] 朱强根，朱安宁，张佳宝，等. 华北潮土区不同耕作方式下土壤动物丰富度与多样性[J]. 土壤，2010，42(2)：236－242.

[20] 吴鹏飞，于晓飞，杨大星. 成都市郊区三种土地利用方式的土壤动物群落特征比较[J]. 西南民族大学学报(自然科学版)，2009，35(5)：1006－1012.

[21] 朱永恒，张衡，韩斐，等. 长江中下游地区农田土地利用对中小型土壤动物群落的影响[J]. 土壤通报，2014，45(2)：314－319.

[22] 黄良水，洪金良，江小成，等. 袋栽黑木耳紫跳虫的为害与防控[J]. 食药用菌，2018，26(4)：263－264.

[23] 季洁，陈霞，林坚贞，等. 两种捕食螨对紫跳虫的捕食功能研究[J]. 食用菌学报，2009，16(3)：72－74.

[24] 孙元. 弹尾虫对食用菌的危害及防治[J]. 北方园艺，2012(17)：143－145.

[25] 林善祥，夏凤. 蘑菇跳虫一新种(弹尾目：球角跳虫科)[J]. 昆虫学报，1983，26(4)：426－427.

[26] 林善祥. 食用真菌跳虫研究 II—长角跳虫科三新种记述(弹尾目)[J]. 动物分类学报，1985，10(2)：196－203.

[27] WEINER W M，XIE Zhijing，LI Yu，et al. *Ceratophysella* species from mushrooms in China (Collembola，Hypogastruridae) [J]. ZooKeys，2019，822(2)：67－77.

[28] NASSONOVA E，SMIRNOV A，FAHRNI J，et al. Barcoding amoebae：comparison of *SSU*，ITS and *CO* Ⅰ genes as tools for molecular identification of naked lobose amoebae [J]. Protist，2010，161(1)：102－115.

[29] HEBERT P D，STOECKLE M Y，ZEMLAK T S，et al. Identification of birds through DNA barcodes [J/OL]. PLoS Biology，2004，2(10)：e312. DOI：10.1371/journal.pbio_0020312.

[30] 严海娟，刘敏，郭晓瑜，等. 毒死蜱、乐果和吡虫啉对白符跳回避行为的影响[J]. 江苏农业科学，2013，41(10)：301－303.

[31] 沙迪，翟清明，张雪萍，等. 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对黑土区农田土壤动物群落的影响[J]. 地理研究，2015，34(5)：872－882.

[32] 陈先玉. 几种杀虫剂防治白菜田棘跳虫的试验[J]. 现代农药，2006，5(2)：55－56.

[33] 严海娟，郭晓瑜，刘敏，等. 3 种农药对土壤中白符跳的毒性效应[J]. 农药，2014，53(1)：34－37.

[34] 刘天学，闻杰，王红星. 10%吡虫啉 WP 防治平菇害虫研究[J]. 周口师范学院学报，2003(2)：36－37.

[35] 矫健，师迎春，吴迪. 吡虫啉在茶树菇及其菌棒上的残留消解动态[J]. 农药，2019，58(2)：115－117.

[36] 马亚杰，胡红岩，马小艳，等. 9 种烟碱类杀虫剂对棉蚜的防治效果研究[J]. 中国棉花，2019，46(3)：25－27.

[37] 李富根，艾国民，李友顺，等. 茚虫威的作用机制与抗性研究进展[J]. 农药，2013，52(8)：558－560.

(责任编辑：杨明丽)

(上接 155 页)

[24] PENG Huan，LONG Haibo，HUANG Wenkun，et al. Rapid，simple and direct detection of *Meloidogyne hapla* from infected root galls using loop-mediated isothermal amplification combined with FTA technology [J/OL]. Scientific Reports，2017，7：44853. DOI：10.1038/srep44853.

[25] PIEPENBURG O，WILLIAMS C H，STEMPLE D L，et al. DNA detection using recombination proteins [J/OL]. PLoS Biology，2006，4(7)：e204. DOI：10.1371/journal.pbio.0040204.

[26] ZAGHLOUL H，EL-SHAHAT M. Recombinase polymerase amplification as a promising tool in hepatitis C virus diagnosis [J]. World Journal of Hepatology，2014，6(12)：916－922.

[27] LAU H Y，BOTELLA J R. Advanced DNA-based point-of-care diagnostic methods for plant diseases detection [J/OL]. Frontiers in Plant Science，2017，8：2016. DOI：10.3389/fpls.2017.02016.

[28] REID M S，LE X C，ZHANG Hongquan. Exponential isothermal amplification of nucleic acids and assays for proteins，cells，small molecules，and enzyme activities：an EXPAR example [J]. Angewandte Chemie International Edition，2018，57(37)：11856－11866.

[29] ZOU Yiping，MASON M G，WANG Yuling，et al. Nucleic acid purification from plants，animals and microbes in under 30 seconds [J/OL]. PLoS Biology，2018，16(5)：e2003916. DOI：10.1371/journal.pbio.2003916.

[30] 侯巨梅，刘铜，左豫虎. 大豆疫霉生物学性状的遗传与变异[J]. 大豆科学，2007，26(6)：918－921.

[31] 田擎，张海峰，曾丹丹，等. 环介导等温扩增技术检测大丽轮枝菌[J]. 植物病理学报，2016，46(6)：721－729.

[32] PUNJA Z K，DE BOER S H，SANFACON H. Biotechnology and plant disease management [M]. Cambridge：CAB International，2007.

[33] HORSFALL J G，COWLING E B. Plant Disease：An advanced treatise [M]. New York，NY：Academic Press，1977.

[34] NARAYANASAMY P. Microbial plant pathogens—detection and disease diagnosis [M]. Dordrecht：Springer Science & Business Media，2010.

[35] VINCELLI P，TISSERAT N. Nucleic acid-based pathogen detection in applied plant pathology [J]. Plant Disease，2008，92(5)：660－669.

[36] MONDAL D，GHOSH P，KHAN M A A，et al. Mobile suitcase laboratory for rapid detection of *Leishmania donovani* using recombinase polymerase amplification assay [J]. Parasites and Vectors，2016，9(1)：281.

[37] HIGGINS M，RAVENHALL M，WARD D，et al. Primed RPA：primer design for recombinase polymerase amplification assays [J]. Bioinformatics，2019，35(4)：682－684.

[38] DAHER R K，STEWART G，BOISSINOT M，et al. Influence of sequence mismatches on the specificity of recombinase polymerase amplification technology [J]. Molecular and Cellular Probes，2015，29(2)：116－121.

(责任编辑：杨明丽)