应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2018, 55(5): 912−918. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2018.111

球孢白僵菌不同碳氮源的研究及对烟粉虱的时间-剂量-死亡率模型分析*

姜 灵** 谢 婷 洪 波 王新谱 贾彦霞 1***

（宁夏大学农学院，银川 750021）

摘 要 **【目的】** 明确不同碳、氮源对球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 生长的影响，确定适合该菌株生长的碳、氮源；通过研究球孢白僵菌对烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的致病力，评价球孢白僵菌防治烟粉虱的潜力。**【方法】** 在培养基中添加不同碳、氮源，研究其对球孢白僵菌生长速率和产孢量的影响，用浸叶法研究不同孢子浓度（1×10^4、1×10^5、1×10^6、1×10^7、1×10^8 个/mL）的球孢白僵菌对烟粉虱的致病力并利用时间-剂量-死亡率模型对数据进行拟合，分析该模型的时间效应和剂量效应。**【结果】** 蔗糖作为碳源、酵母作为氮源时球孢白僵菌的生长速率快和产孢量高；利用时间-剂量-死亡率模型对测定的数据进行拟合分析得出，随着接种天数的增加，球孢白僵菌的 LC_{50}、LC_{90} 逐渐降低，剂量效应增强；随着孢子浓度的增加，LT_{50} 逐渐降低，时间效应增强。**【结论】** 球孢白僵菌的合适碳源为蔗糖，最适氮源为酵母。该菌株对烟粉虱有较强致病力，1×10^8 个/mL 的孢子浓度可作为防治烟粉虱的理想浓度，本试验为球孢白僵菌对烟粉虱的生物防治提供有力依据。

关键词 球孢白僵菌，碳源，氮源，致病力，时间-剂量-死亡率模型

Effects of different carbon and nitrogen sources on *Beauveria bassiana* and a time-dose-mortality model of effectiveness of *B. bassiana* as a biological control for *Bemisia tabaci*

JIANG Ling** XIE Ting HONG Bo WANG Xin-Pu JIA Yan-Xia***

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract **【Objectives】** To understand the effects of different carbon and nitrogen sources on the growth of *Beauveria bassiana*, identify optimum carbon and nitrogen sources for this species, investigate the virulence of *Bemisia tabaci* and evaluate the potential of *B. bassiana* as a biological control for this pest. **【Methods】** The growth and sporulation of *B. bassiana* were investigated using growth medium with different carbon and nitrogen sources, and the virulence of *B. bassiana* to *B. tabaci* was measured by immersing leaves in a conidial suspension at concentrations of 1×10^4,1×10^5,1×10^6,1×10^7,1×10^8 conidia/mL. A time-dose-mortality model was used to analyze the effects of dosage and time on the virulence of *B. bassiana* to *B. tabaci*. **【Results】** *B. bassiana* maintained higher growth and sporulation rates in medium containing sucrose and yeast. A time-dose-mortality model showed that LC_{50} and LC_{90} decreased over time, whereas the dose effect increased. The LT_{50} decreased at higher conidial suspension concentrations and the time effect increased. **【Conclusion】** The best carbon source was sucrose and the best nitrogen source was yeast. *B. bassiana* had high virulence to *B. tabaci* and the best control was achieved at a concentration was 1×10^8 conidia/mL. These results indicate that *B. bassiana* is a promising biological control agent for *B. tabaci.*

Key words *Beauveria bassiana*, carbon sources, nitrogen source, virulence, time-dose-mortality model

*资助项目 Supported projects：宁夏“十三五”重大科技专项(2016BZ09-03)

**第一作者 First author，E-mail：1285615808@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：helenjia_2006@126.com

收稿日期 Received：2017-08-16，接受日期 Accepted：2017-11-21

烟粉虱 *Bemisia tabaci*（Gennadius）属半翅目（Hemiptera）粉虱科（Aleyrodidae），是设施蔬菜的主要害虫之一。其寄主广泛，杂食性强，可为害包括茄科和豆科蔬菜在内的 121 科 898 种植物（向玉勇等，2004；张灿等，2015）。烟粉虱的若虫和成虫吸取寄主植物的汁液，造成叶片退绿、卷曲，其繁殖力强，对设施蔬菜为害十分严重。由于化学杀虫剂的高频、大量使用，造成害虫抗药性增加，贾尊尊等（2017）发现吐鲁番地区的烟粉虱成虫对吡虫啉、啶虫脒等新烟碱类杀虫剂抗性上升较快，此外化学杀虫剂对环境和人畜的安全性也存在风险。因此，利用虫生病原真菌防治害虫是众多学者研究的热点。

球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 是一种广谱的虫生病原真菌，可侵染 149 科 700 多种昆虫（林海萍等，2006），我国已登记注册 20 余种白僵菌产品（周哲宇等，2016），主要用于防治玉米螟、马尾松毛虫、甘薯象甲等农林害虫（李增智，2015），刘兴磊等（2011）还用于防治大豆蚜虫，对温室害虫的防治主要为烟粉虱（Wraight，1998；曹伟平等，2007；王登杰等，2015；王艳秋等，2016）。设施园艺是宁夏战略主导产业之一，粉虱又是为害设施蔬菜的主要害虫，目前宁夏地区利用虫生真菌防治害虫并不广泛，通过探究球孢白僵菌对该地区粉虱的防治效果，为生物防治提供有效途径。球孢白僵菌可利用多种营养物质来满足自身生长，包括碳源、氮源及微量元素（陆晴等，2008），不同的营养物质会影响球孢白僵菌的生长和产孢，进而影响杀虫活性（李农昌等，1996）。本试验研究 5 种碳源和 5 种氮源对球孢白僵菌生长的影响，筛选球孢白僵菌生长最佳的碳源和氮源；在室内对烟粉虱若虫进行生物测定，利用时间-剂量-死亡率模型（简称 TDM 模型）对球孢白僵菌对烟粉虱致病力进行模拟分析，得出球孢白僵菌对烟粉虱的时间效应和剂量效应，进一步明确球孢白僵菌对烟粉虱的防治潜力，为温室大规模应用提供有力依据。

1　材料与方法

1.1　供试菌株与虫源

供试菌株：球孢白僵菌（*B. bassiana*）编号为 BNCC 122077，由苏州北纳创联生物技术有限公司提供，在前期试验中对烟粉虱有较高的致病力。

供试虫源：饲养于宁夏大学农科实训基地的温室，温室中种植番茄，品种为京番 301。

试验时将盆栽的番茄植株放入温室，48 h 后取出，清除所有成虫后放入光照培养箱，25 ℃下培养，12 d 后选取带有 3 龄若虫的叶片备用。

1.2　不同碳源对球孢白僵菌生长的影响

基础培养基：葡萄糖 30 g、$NaNO_3$ 2 g、KCl 0.5 g、K_2HPO_4 1 g、$MgSO_4$ 0.5 g、$FeSO_4$ 0.01 g、琼脂粉 20 g、H_2O 1 L。根据 8 g/L 的含碳量，以蔗糖、麦芽糖、乳糖、山梨醇、可溶性淀粉替换基础培养基的葡萄糖，制成含不同碳源的培养基。将生长均匀的球孢白僵菌用直径 5 mm 的打饼器制出菌饼，放入不同的培养基中央，每种培养基设 5 次重复，（25±1）℃培养。每隔 2 d，利用十字交叉法测量其直径，10 d 后，计算球孢白僵菌的生长速率并在菌落边缘与中心 1/2 处用直径 5 mm 的打饼器制出 2 个菌饼，放入 20 mL 含 0.05%吐温 80 的无菌水中，磁力搅拌器充分混匀，4 层纱布过滤，再次混匀后血球计数板计数，计算产孢量。

1.3　不同氮源对球孢白僵菌生长的影响

同 1.3 的基础培养基，根据 0.5 g/L 的含氮量，以硫酸铵、尿素、蛋白胨、酵母粉、甘氨酸替换基础培养基中的硝酸钠，制成不同氮源的培养基。接种和统计方法同 1.3。

1.4　球孢白僵菌对烟粉虱若虫的致病力测定

将 PDA 培养基上培养 10 d 的球孢白僵菌的孢子粉轻轻刮入含 0.05%吐温 80 的无菌水中，充分洗脱后，磁力搅拌器充分混匀，4 层纱布过滤，充分混匀后，血球计数板计数，将孢子浓度调至 1×10^8 个/mL，依次稀释为 1×10^7、1×10^6、1×10^5、1×10^4 个/mL。选取带有若虫的番茄叶片，每叶片保留大小一致的 30 头若虫，多余若虫用接种针轻轻挑去。将带有若虫的叶片分别浸入不同浓度的孢子悬液中，30 s 后取出，置于吸

水纸上自然晾干，然后放入有滤纸保湿的培养皿中，叶柄处用无菌水浸湿的棉球包住。培养皿用保鲜膜封口，用昆虫针扎出小孔，保证皿内外空气正常流动，培养皿置于光照培养箱内（26±1）℃，相对湿度 80%，L∶D=14∶10 下培养，每个处理设 3 次重复，每天观察记录粉虱的死亡情况，计算累计死亡率。将死亡的粉虱轻轻挑入滤纸保湿的培养皿中保湿培养，有菌丝长出为有效侵染致死。以浸入 0.05%吐温 80 的无菌水的处理为对照。

1.5 数据处理

菌株生长速率、产孢量利用 Duncan's 新复极差法分析数据的差异显著性。

粉虱致病力的数据利用时间-剂量-死亡率模型（简称 TDM 模型）进行拟合分析，方法参考唐启义和冯明光等（2007）：受试生物在时间 t_j（j=1，2，…，j）被供试因子的剂量 d_i（i=1，2，…，i）致死的概率表达见式（1）。

$$p_{ij}=1-\exp[-\exp(\tau_i+\beta\lg(d_i))] \quad (1)$$

式（1）中，β 为每个存在的每个供试受体所接受的活（毒）性分子的平均数目，即剂量效应的斜率，τ_j 是至时间 t_j 的时间效应参数，p_{ij} 是剂量 d_i 在第 j 个时间单位产生的累计死亡概率，由于累计死亡率概率在时间上是连续的，因此考虑在时间区间[t_{i-1}，t_j]内可能遭受的死亡率即条件死亡概率即条件死亡概率，可表示为式（2）。

$$p_{ij}=1-\exp[-\exp(\gamma_j+\beta\lg(d_i))] \quad (2)$$

式（2）中 β 与（1）中含义相同，γ_j 为描述时间区间[t_{i-1}，t_j]内时间效应的待估参数，由于条件死亡概率是独立的随机变量，所以式（2）更适于进行模型的拟合。该式可通过二项分布最大似然函数的逼近，获得 γ_j 和 β 的估计值。

所有数据的分析和模型的模拟通过 DPS7.05 数据处理软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同碳源对球孢白僵菌生长的影响

不同碳源对球孢白僵菌的生长速率和产孢量的影响不同，蔗糖作为碳源时，球孢白僵菌生长最快，生长速率能达到 2.51 mm/d，显著高于其他碳源（P<0.05），其次为葡萄糖，可溶性淀粉和麦芽糖，而甘露醇和山梨醇作为碳源时，菌株生长较慢，生长速率在不同碳源中均存在显著差异（P<0.05）；产孢量在蔗糖和可溶性淀粉培养基中较高，分别为 9.07×10^5、9.0×10^5 个/mL，二者之间无显著差异，但显著高于其他碳源（P<0.05），其次为甘露醇、葡萄糖、麦芽糖，在山梨醇中产孢最少（表 1）。

表 1 不同碳源对球孢白僵菌生长指标的影响

Table 1 Effects of different carbon sources on the growth of *Beauveria bassiana*

碳源 Carbon sources	生长速率（mm/d） Rate of growth	产孢量（10^5个/mL） Sporulation
蔗糖 Sucrose	2.51±0.10a	9.07±0.41a
可溶性淀粉 Soluble starch	2.13±0.06b	9.00±0.42a
甘露醇 Mannite	1.56±0.05d	6.47±0.35b
麦芽糖 Maltose	1.82±0.05c	5.80±0.58bc
山梨醇 Sorbitol	1.34±0.01e	4.40±0.35c
葡萄糖 Glucose(CK)	2.29±0.05b	6.53±0.35b

表中数据为平均数±标准误，同列数据后标有不同小写字母表示差异显著（Duncan's 新复极差法，P<0.05）。表 2 同。

Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters in the same column indicate significant difference (Duncan's new multiple range text , P<0.05). The same as table 2.

2.2 不同氮源对球孢白僵菌生长的影响

不同氮源对球孢白僵菌的生长速率和产孢量影响不同，酵母为氮源时，球孢白僵菌生长最快，生长速率为 4.48 mm/d，显著高于其他氮源（P<0.05），其次为蛋白胨，生长速率可达到 4.21 mm/d，而在硫酸铵、尿素、甘氨酸和硝酸钠培养基中生长较慢，菌株的生长速率都在 2 mm/d 左右，差异不显著；球孢白僵菌的产孢量在酵母培养基中最高，可达到 12.27×10^5个/mL，与其他氮源差异显著（P<0.05），其次为蛋白胨、甘氨酸，产孢较少的硫酸铵、硝酸钠、尿素培养基，三者之间无显著差异（P<0.05）。各种供试

氮源比较，有机氮源的生长速率和产孢量均高于无机氮源（表 2）。

表 2　不同氮源对球孢白僵菌生长指标的影响
Table 2　Effects of different nitrogen sources on the growth of *Beauveria bassiana*

氮源 Nitrogen sources	生长速率（mm/d）Rate of growth	产孢量（10^5个/mL）Sporulation
酵母 Yeast	4.48±0.02a	12.27±0.58a
蛋白胨 Peptone	4.21±0.06b	8.87±0.57b
甘氨酸 Glycine	2.66±0.10c	7.64±0.13c
硫酸铵$(NH4)_2SO_4$	2.14±0.10d	6.40±0.12cd
尿素 Carbamide	2.30±0.07d	5.86±0.12d
硝酸钠 $NaNO_3$(CK)	2.29±0.05d	6.27±0.13d

2.3　不同浓度的球孢白僵菌对烟粉虱的致病力

由图 1 可以看出，球孢白僵菌的孢子浓度越大，对粉虱的致病力越强，死亡率越高；接种后时间越长，各浓度下粉虱的死亡率也逐渐增加，在接种 2 d 后，所有处理的粉虱若虫开始死亡，孢子浓度为 1×10^8 个/mL 时，侵染 7 d 的粉虱累积校正死亡率可达到 82.76%，处理死亡的若虫保湿培养后均表现出为真菌侵染致死的症状，即虫体表面长出菌丝，随后产生大量粉状孢子。

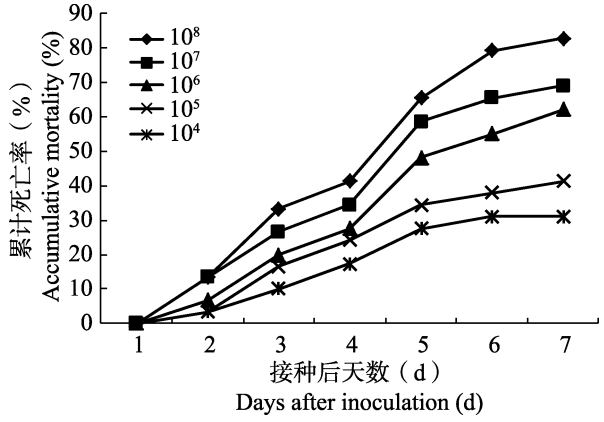


图 **1**　接种球孢白僵菌后烟粉虱的逐日累积死亡率
Fig. 1　The daily accumulative mortality of *Bemisia tabaci* after treatment with *Beauveria bassiana*

2.4　球孢白僵菌对烟粉虱致病力的时间-剂量-死亡率模型

利用时间-剂量-死亡率模型对图 1 处理的数据进行模拟，各参数的估计值 β、γ_j 的 t-检验均达到极显著水平，累积时间效应参数 τ_i 随着接种时间的增加而增大，说明供试菌株的剂量和时间对烟粉虱的死亡率作用显著。由于接种菌株 1 d 后，无粉虱死亡，因此模型从接种后第 2 天的数据开始进行模拟分析。该条件死亡率模型进行 Hoser-Lemeshown 拟合度分析得出：χ^2=2.3631，由于 df=8 时，$\chi^2_{0.05}$=15.51，现 χ^2<15.51，因此所建模型拟合不存在异质性，即能无偏差的描述不同浓度的球孢白僵菌与烟粉虱间的互作关系（表 3）。

2.5　球孢白僵菌对烟粉虱致死的剂量效应

由图 2 得出，根据 TDM 模型估计出球孢白僵菌侵染烟粉虱若虫不同时间的剂量效应，随着接种天数的增加，粉虱致死的孢子浓度随之降低，LC_{50}、LC_{90} 也逐渐降低，剂量效应增强；在接种 7 d 后，LC_{50}、LC_{90} 的估计值对应的孢子浓度分别为 2.21×10^5 个/mL、7.95×10^8 个/mL，在实际试验中，接种 7 d 后，孢子浓度为 1×10^8 个/mL 时粉虱的累积死亡率没有达到 90%，因此 LC_{90} 的估计值偏大。

2.6　球孢白僵菌对烟粉虱致死的时间效应

根据 TDM 模型估计出球孢白僵菌侵染烟粉虱若虫致死的时间效应，随着孢子浓度的增加，LT_{50} 逐渐降低，1×10^6、1×10^7、1×10^8 个/mL 的孢子浓度下对应的 LT_{50} 分别为 5.42、4.56、4.02 d，由于孢子浓度为 1×10^4、1×10^5 个/mL 时，粉虱死亡率未达到 50%，所以无法计算 LT_{50}，在整个试验处理中各浓度均为达到 90%的死亡率，因此也无法计算 LT_{90}。

3　结论与讨论

营养物质是影响球孢白僵菌生长的主要因素之一，主要包括碳源、氮源、无机盐及微量元素等，营养物质不足，会导致菌株生长受限，产孢量减少，从而影响菌株的稳定性及杀虫活性（James，2001；程国华等，2006；齐永霞等，2011）。碳、氮源作为主要的营养物质，对保持球孢白僵菌侵染力及菌株稳定性有重要意义。

表 3 球孢白僵菌对烟粉虱若虫的 TDM 模型模拟与参数估计

Table 3 Parameters estimated by fitting the time-dose-mortality (TDM)model to assay data of *Beauveria bassiana* against the nymphs of *Bemisia tabaci*

条件概率模型 Conditional mortality model					累计概率模型 Cumulative mortality mode			
参数 Parameter	估计值 Value	标准误差 SE	*t*-检验 *t*- test	*P* 值 *P* value	参数 Parameter	估计值 Value	方差 τ	协方差 τ, β
β	0.337 6	0.079 6	4.244 2	0.000 3	β	0.337 6	0.001 1	0.001 1
$\gamma 2$	- 4.610 8	0.603 7	7.637 3	0.000 1	τ_2	- 4.610 8	0.065 9	- 0.007 6
$\gamma 3$	- 3.956 5	0.563 4	7.022 1	0.000 1	τ_3	- 3.537 9	0.054 9	- 0.007 5
$\gamma 4$	- 4.080 6	0.566 8	7.199 3	0.000 1	τ_4	- 3.079 8	0.051 9	- 0.007 4
$\gamma 5$	- 3.280 4	0.546 5	6.003 0	0.000 1	τ_5	- 2.481 9	0.050 1	- 0.007 4
$\gamma 6$	- 3.950 1	0.596 9	6.617 3	0.000 1	τ_6	- 2.274 6	0.049 6	- 0.007 4
$\gamma 7$	- 4.489 3	0.672 9	6.671 8	0.000 1	τ_7	- 2.171 0	0.049 3	- 0.007 3

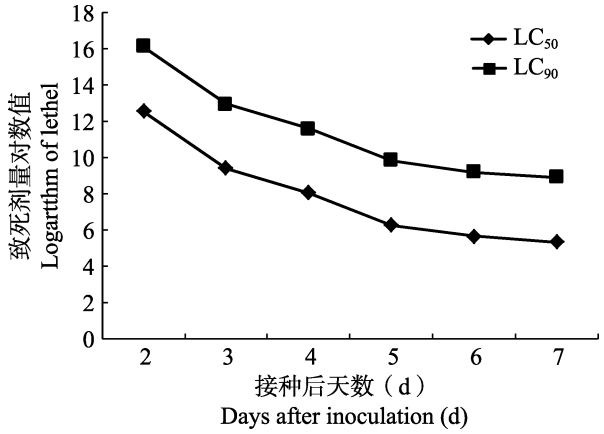


图 2 球孢白僵菌对烟粉虱若虫致死剂量对数值

Fig. 2 LC_{50} and LC_{90} values of *Beauveria bassiana* against the nymphs of *Bemisia tabaci*

本试验研究了不同碳氮营养对球孢白僵菌生长指标的影响，结果表明：在不同供试碳源培养基中，球孢白僵菌产孢量正常，但菌苔较薄，颜色呈白色偏黄。蔗糖作碳源时，球孢白僵菌生长最快且产孢最高，即球孢白僵菌对蔗糖的利用率高，这与齐永霞等（2011）人研究结果一致；在不同供试氮源培养基中，球孢白僵菌生长茂盛，菌苔较厚，颜色正常呈乳白色，在酵母培养基中生长最快且产孢最高，陆晴等（2008）研究中指出尿素和硫酸铵等抑制球孢白僵菌生长及产孢，但本试验中尿素和硫酸铵作为氮源时，生长指标较低，并未表现出抑制，由于试验菌株为购买菌株，在生产说明书上只说明了适合真菌通用的 PDA 培养基，最适的碳源、氮源并未给出，该试验研究不同的碳氮源对菌株生长及产孢的影响，选取蔗糖为最适碳源，酵母为最适氮源，使菌株增加产孢，为大田试验提供产孢基础。通常菌株在经过继代培养后总会出现杀虫活性下降的现象，这与菌株培养的条件有关，选择合适的培养条件是本试验今后要研究的重要内容。

时间-剂量-死亡率模型将时间和剂量效应统一到一个模型中，同时分析时间、剂量及两者互作的效应，更能充分体现生物测定数据的完整性和客观性，有利于评价微生物杀虫剂对害虫防治效果，对生物测定有重要理论和实践价值（谢宁等，2010；王定锋等，2013）。通过时间-剂量-死亡率模型分析致病力，可以从不同角度评价菌株的防治效果。长期以来，诸多研究者利用虫生真菌防治粉虱，但是菌株的来源和种类不同，对粉虱的防治效果也有差别，王联德等（2003）利用蜡蚧轮枝菌 Vp28、V16063 防治烟粉虱，两株菌的致死中时 LT_{50} 在孢子浓度为 10^5-10^6 个/mL 时接近，但孢子浓度增加或减少两株菌表现出不同的杀虫效果，田晶等（2017）利用玫烟色棒束孢 IF-1106 防治不同龄期的烟粉虱，对 3 龄若虫的死亡率未达到 50%，在本试验中，当球孢白僵菌孢子浓度为 10^8 个/mL 时，LC_{50} 为 4.02 d，防治效果强于玫烟色棒束孢 IF-1106，因此，1×10^8 个/mL 的孢子浓度可作为防治烟粉虱的理想浓度。由 TDM 模型分析得出的 β 值为 0.3376，该值小于国外研究多种杀虫剂的参数估计范围（1.4-3.5）（Preisler and Robertson，1989），说明该菌株与化学杀虫剂相比，前期的杀虫效果较

慢，符合微生物杀虫的一般规律。若在温室施用该菌株，要达到理想的防治效果，对温度、湿度等环境条件要求较高，摸索温室中最佳施用条件也是下一步试验研究的内容，从而安全有效地控制烟粉虱。

参考文献 (References)

Cao WP, Wang JY, Feng SL, Wang RY, Du LX, Song J, Chen HY, 2007. Selection of HFW-05 strain by UV mutagenesis of *Beauveria bassiana* and its virulence to *Bemisia tabaci* nymph. *Chinese Journal of Biological Control*, 23(2): 133–137.[曹伟平, 王金耀, 冯书亮, 王容燕, 杜立新, 宋健, 陈红印, 2007. 球孢白僵菌 HFW-05 的诱变筛选及其对烟粉虱若虫的毒力测定. 中国生物防治, 23(2): 133–137.]

Cheng GH, Shu J, Ding KJ, 2006. Study on Nutrition demand and culture condition of *Beauveria bassiana. Chinese Agricultural Science Bulletin*, 22(5): 365–368.[程国华, 舒静, 丁克坚, 2006. 球孢白僵菌营养需求及培养条件研究. 中国农学通报, 22(5): 365–368.]

James RR, 2001. Effects of exogenous nutrients on conidial germination and virulence against the silverleaf whitefly for two *Hyphomycetes*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 77(2): 99–107.

Jia ZZ, Wang XW, Fu KY, Ding XH, Guo WC, Jiang WH, Tuerxun A, Kader A, 2017. Biotype identification of *Bemisia tabaci* and 11 kinds of common pesticides resistance status in Xinjiang main agricultural areas. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 54(2): 304–312. [贾尊尊, 王小武, 付开赟, 丁新华, 郭文超, 吐尔逊·阿合买提, 姜卫华, 卡德·艾山, 2017. 新疆主要农区烟粉虱生物型鉴定及其对11种常用杀虫剂的抗性监测. 新疆农业科学, 54(2): 304–312.]

Li NC, Fan MZ, Li CR, Li H, Gao ZH, Zhu RD, 1996. Relationship between culture condition and virulence of *Beauveria bassiana. Journal of Anhui Agricultural University*, 23(3): 254–259.[李农昌, 樊美珍, 李春如, 李华，高智辉，朱润德, 1996. 白僵菌有关培养条件及其与毒力关系的研究. 安徽农业大学学报, 23(3): 254–259.]

Li ZZ, 2015. History, progress and current status of the application of fungi against pest insects in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(5): 699–711.[李增智, 2015. 我国利用真菌防治害虫的历史、进展及现状. 中国生物防治学报, 31(5): 699–711.]

Lin HP, Han ZM, Zhang X, Mao SF, 2006. Current research situation on *Beauveria bassiana* and prospects of how to improve its pesticidal effects. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 23(5): 575–580.[林海萍, 韩正敏, 张昕,毛胜凤, 2006. 球孢白僵菌研究现状及提高其杀虫效果展望. 浙江林学院学报, 23(5): 575–580.]

Liu XL, Zhang ZG, Xu WJ, Liu Y, Wang JG, Li QY, 2011. Toxicity of fifteen strains of *Beauveria bassiana* against *Aphis glycines. Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(6): 1699–1702. [刘兴磊，张正坤，徐文静，刘影，王金刚，李启云，2011. 球孢白僵菌对大豆蚜毒力的室内生物学测定. 应用昆虫学报，48(6): 1699–1702.]

Lu Q, Cao WP, Dong JZ, Wang JY, Feng SL,Wang RY, Du LX, 2008. Effects of different carbon and nitrogen sources on the growth and extracellular protease production of *Beauveria bassiana* HFW-05. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica,* 23(5): 142–146.[陆晴, 曹伟平, 董建臻，王金耀，冯书亮, 王容燕，杜立新, 2008. 不同碳、氮营养对球孢白僵菌 HFW-05 的生长及胞外蛋白酶产量的影响. 华北农学报, 23(5): 142–146.]

Preisler HK，Robertson JL, 1989．Analysis of time-dose-mortality data. *Journal of Economic Entomology*, 82(6): 1534–1542.

Qi YX, Chen FX, Li ZZ, 2011. Effect of Carbon sources and nitrogen sources on the biological characteristics and antifungal activity of *Beauveria bassiana. Acta Laser Biology Sinica*, 20(1): 38–44.[齐永霞, 陈方新, 李增智, 2011. 不同碳、氮营养对球孢白僵菌生物学特性和抑菌活性的影响. 激光生物学报, 20(1): 38–44.]

Tang QY, Feng MG, 2007. DPS Data Processing System: Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining. Beijing: Science Press. 336–342.[唐启义, 冯明光, 2007. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘. 北京: 科学出版社.336–342.]

Tian J, Tian HK, Diao HL, Fu SJ, Hao C, Ma RY, 2017. Time-dose-mortality model of *Isaria fumosorosea* against *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 46(1): 70–75.[田晶，田浩楷，刁红亮，付淑慧，郝赤，马瑞燕，2017. 玫烟色棒束孢对烟粉虱致病的时间-剂量-死亡率模型分析. 河南农业科学, 46(1): 70–75.]

Wang DF, Liu FJ, Wu GY, 2013. Time-dose-mortality Model Analysis of *Beauveria bassiana* XJBb 3005 against *Myllocerinus aurolineatus. Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 28(8): 807–811.[王定锋，刘丰静，吴光远，2013. 球孢白僵菌 XJBb3005 对茶丽纹象甲致病力的时间-剂量-死亡率模型分析. 福建农业学报, 28(8): 807–811.]

Wang DJ, Wu SY, Lei ZR, Wang HH, 2015. Transcriptome analysis

of *Bemisia tabaci* nymphs infected with *Beauveria bassiana*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(1): 47–55.[王登杰, 吴圣勇, 雷仲仁, 王海鸿, 2015，感染球孢白僵菌的烟粉虱若虫免疫应答转录组分析. 应用昆虫学报, 52(1): 47–55.]

Wang LD, Huang J, Lin GY, Liang ZS, 2003. The time-dose-mortality model of two *Verticillium lecanii* isolates on sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (*Natural Science Edition*), 32(2): 167–171.[王联德, 黄建, 林谷园，梁智生，2003. 蜡蚧轮枝菌对烟粉虱的时间-剂量-死亡率模型研究. 福建农业大学学报，32(2): 167–171.]

Wang YQ, Zhou TT, Lin HF, Jin P, Li Mao Y, Chen DX, 2016. Time-dose-mortality of the *Beauveria bassiana* strain Bb84 on Q-biotype *Bemisia tabaci. Chinese Journal of Pesticide Science*, 18(4): 459–464.[王艳秋, 周婷婷, 林华峰, 金鹏, 李茂业, 陈德鑫, 2016. 球孢白僵菌 Bb84 对 Q 型烟粉虱的时间-剂量-死亡率模型分析. 农药学学报, 18(4): 459–464.]

Wraight SP, Carruthers RI, Bradley CA, Jaronski ST, Lacey LA, Wood P, Galaini-Wraight S, 1998. Pathogenicity of the entomopathogenic fungi *Paecilomyces* spp. and *Beauveria bassiana* against the silverleaf whitefly, *Bemisia argentifolii. Invertebr. Pathol.,* 71(3): 217–226.

Xiang YY, Li ZZ, Zhang F, Luo C, 2004. Progress of study on *Bemisia tabaci* (Gennadius) and *Trialeurodes vaprorariorum* (Westwood). *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 23(4): 352–359.[向玉勇, 李子忠, 张帆, 罗晨, 2004. 烟粉虱和温室粉虱的研究进展. 山地农业生物学报, 23(4): 352–359.]

Xie N, Wang ZK, Zhang JW, Chen H, Yin YP, 2010. Time-dose-mortality model analysis of emulsifiable powder formulation of *Metarhizium anisopliae* CQMa128 against *White Grubs*. *Chin. J. Biological Control*, 26(4): 436–441.[谢宁, 王中康, 张建伟, 陈环, 殷幼平, 2010. 绿僵菌 CQMa128 乳粉剂对蛴螬时间-剂量-死亡率模型分析. 中国生物防治, 26(4): 436–441.]

Zhang C, Wang XM, Ren SX, 2015. Review of current research on *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(1): 32–46.[张灿, 王兴民, 任顺祥, 2015, 烟粉虱热点问题研究进展. 应用昆虫学报, 52(1): 32–46.]

Zhou ZY, Zhang HH, Wu Hao, Zhu Hong, 2016. Pathogenicity and infestation differentiations of *Beauveria bassiana* against *Bemisia tabaci* and *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Biological Control*, 32(6): 728–734.[周哲宇, 张航航, 吴昊, 朱虹, 2016. 球孢白僵菌对烟粉虱和小菜蛾的致病力及其侵染差异分析. 中国生物防治学报, 32(6): 728–734.]

Zhu MY, Tian L, 2012. Advanced in the research of conidium preparation additives and formulations of *Beauveria bassiana*. *Journal of Shandong Polytechnic University,* 26(1): 13–17.[朱明媛, 田丽, 2012. 球孢白僵菌分生孢子制剂助剂及剂型研究进展. 山东轻工业学院学报, 26(1): 13–17.]