

DOI: 10.11766/trxb201808100354

# Meta分析评估中国木霉对枯萎病防控效果及其影响因素

操一凡 沈宗专 刘珊珊 姜雪婷 李荣<sup>†</sup> 沈其荣

(南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省有机废弃物资源化高技术研究重点实验室/教育部资源节约型肥料工程技术研究中心  
/江苏省有机废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095)

**摘要** 由致病性尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*) 侵染引起的植物枯萎病是一种真菌性土传病害, 对多种经济作物产生严重危害。木霉生物防治作为一种安全、环保、经济效益高且长效的防治措施已成为世界范围内的发展趋势, 但其确切防效及其影响因素尚不明确。基于中国范围内研究所发表的中英文文章, 运用Meta分析(元分析)方法研究了木霉对土传枯萎病的防控效果, 同时分析了影响木霉防控效果的多种因素。结果表明, 施用木霉在整体上对枯萎病具有显著的防控效果, 其中, 作物科类、木霉形式、施用方法、是否与其他方式联合及气候类型(基于大田试验)5类因素对木霉防效有显著影响; 木霉种类、试验类型、木霉菌剂施用剂量和木霉菌剂施用次数对结果无显著影响。本研究结果预计能为田间高效应用木霉防控土传枯萎病提供参考。

**关键词** 枯萎病; 尖孢镰刀菌; 木霉; 生物防治; Meta分析

**中图分类号** S144.2 **文献标识码** A

作为植物有益菌的一种, 木霉是自然界普遍存在的土壤习居真菌, 由于其具有优异的促生和抗病功能, 现已被国内外广泛关注, 并同时被开发成系列农用生物制品<sup>[1-3]</sup>。枯萎病是由尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*) 不同专化型引起的一种常见土传真菌性病害, 是世界范围内分布最广、毁灭性最强的植物病害之一。由于迄今未有基于化学农药有效防控枯萎病的发现, 利用有益微生物或其制品进行生物防控成为了一种安全、环保、经济效益高且长效的防治措施<sup>[1]</sup>。作为一种资源丰富的拮抗

微生物, 木霉真菌在防控作物枯萎病的研究中应用广泛, 其防控机制主要有重寄生、竞争作用、抗生作用、促生作用和诱导植物抗性<sup>[2-4]</sup>。

尽管诸多研究均报道木霉对枯萎病有较好的防控效果, 但不少学者也发现其在田间应用效果不稳定。如Yang等<sup>[5]</sup>研究发现, 单一木霉及不同种木霉混合对枯萎病具有不同的防效。纪明山等<sup>[6]</sup>研究表明, 木霉施用剂量对于防控枯萎病效率影响较大, 施用低剂量的防效显著低于高剂量的应用效果。闫敏等<sup>[7]</sup>研究发现, 木霉固体菌剂的防效显

\* 农业部“948”项目(2016-X45)、中央高校基本科研业务费专项资金项目重点项目(KYZ201871)、广东省科技计划项目(2016B020202006)和江苏省高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A061)共同资助 Supported by “948” Program of Ministry of Agriculture in China (No. 2016-X45), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. KYZ201871), the Science and Technology Planning Project of Guangdong Province in China (No. 2016B020202006) and the Top-notch Academic Programs Project of Jiangsu Higher Education Institution of China (No. PPZY2015A061)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lirong@njau.edu.cn

作者简介: 操一凡(1996—), 女, 安徽人, 硕士研究生, 主要研究领域植物营养学。E-mail: 13705187578@163.com

收稿日期: 2018-08-10; 收到修改该日期: 2018-11-22; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-12-17

著高于液体菌剂。系统评估和分析影响木霉应用效果的因素,对进一步提升木霉防控枯萎病效率和稳定性有重要意义。我国地域辽阔,土壤类型多样、气候类型复杂,在应用和评估木霉产品防控作物枯萎病时,需要综合作物类型、试验类型(温室或田间)、功能菌株种类、产品形式、使用方法(施用模式、施用剂量、施用次数和联合作用)等影响因素进行整体考虑。

Meta分析是将相同研究问题的多个研究结果视为一个多中心研究的结果,运用多中心研究的统计方法进行综合分析,可以量化地综合现有试验数据,系统分析某种措施的综合效应及其影响因素<sup>[8]</sup>。本研究通过Meta分析,综合解析我国木霉施用对土传枯萎病的防控效果及其主要影响因子,以评估木霉对土传枯萎病防控的确切贡献。Meta分析可以克服传统综述检索文献策略模糊、文献查全率不高和研究结论具有主观性的局限性,为实际农业生产问题和未来研究方向提出参考性建议。本研究重点寻找木霉对枯萎病防控的平均效应,并回答以下问题:大田的复杂环境能否取得与室内防治效果的一致性,不同种类木霉是否有不同的防控效果,木霉菌的施用方法是否会影响其防效,以及气候类型对防效有无影响等。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集

本研究所选文献来源于CNKI(中国知识基础设施工程)中国知网、万方数据库以及Web of Science。中文数据库以木霉和枯萎病为关键词,Web of Science数据库以fusarium wilt 和Trichoderma为关键词进行检索,截至时间分别为2018年4月9日和2018年8月18日。从CNKI中国知网、万方数据库分别检索得到99和129篇研究文献,从Web of Science中得到529篇研究文献。再通过以下标准进行文献筛选:(1)具有一个不施加木霉的对照组;(2)具有发病率(DI),即DI=枯萎植株数/总植株数;(3)具有发病率的均值和样本量;(4)数据重复的文献仅选取其中一篇;(5)在中国境内进行的试验。按照以上的筛选标准,阅读文献题目、摘要或全文后将不符合要求的文献去除。

本研究将筛选后的48篇文献<sup>[5-7, 9-12]</sup>(其余见附录)、147组数据纳入Meta分析,并提取以下数据信息:不施加木霉的对照组和施加木霉的处理组在以下各指标下的平均值、标准差和样本量:试验类型、作物种类及科类、木霉种类、菌剂形式、施用模式、联合作用、施用剂量、施用次数和气候类型。进行数据收集时,将 $X_c$ 和 $X_t$ 分设为对照组和处理组均值, $SD_c$ 和 $SD_t$ 分设为对照组和处理组标准差, $n_c$ 和 $n_t$ 分设为对照组和处理组样本量,即处理的重复数;发病率为最后一次测的发病率;试验类型分为盆栽和大田试验;木霉菌剂的施用方法中种子处理包括拌种和种子包衣,蘸根为移栽前蘸根促使木霉提前定殖,灌根为移栽后根部施入,此外还有拌土、穴施方法,多种方法指以上5种方法的2种或2种以上的组合运用;木霉形式分为固体菌剂、液体菌剂和生物有机肥三类;木霉种类中多种混施指施用2种及以上不同木霉;木霉菌剂的施用剂量,统一单位为cfu;考虑气候带对大田试验的影响。具体数据见表1,文献中表格和文章的数据直接提取,图片采用Getdata graph digitizer(图表数字化工具)软件提取数据。

### 1.2 Meta分析

本研究采用R软件的Metafor软件包,基于效应值(Effect Size, ES)进行分析。ES指征处理组与对照组的差异大小,即表明某因素的影响大小,ES越大,则该因素的效应越强。一般以0或1为界限,比如大于0或1,表示处理强于对照。其中,如果出现标准差的缺失,则采用DeMalach等<sup>[13]</sup>的方法进行计算,公式如下:

$$S_j = \frac{\sum_i^k S_i \sqrt{n_i}}{k S_j \sqrt{n_j}} \quad (1)$$

式中, $S_j$ 为第j个未知标准误; $n_j$ 为第j个对应样本量; $S_i$ 为第i个已知标准误; $n_i$ 为第i个对应样本量;k为已知标准误的研究数据的例数。

相较于差值,考虑对照组与处理组的结局指标的比值更有实际意义,因此选择反应比(Response ratio)<sup>[14]</sup>的自然对数作为效应值,并计算相应的研究内方差:

$$\ln R = \ln \frac{X_t}{X_c} \quad (2)$$

$$v\ln R = \frac{SD_c^2}{n_c X_c^2} + \frac{SD_i^2}{n_i X_i^2} \quad (3)$$

式中,  $X_c$ 为对照组均值,  $X_i$ 为处理组均值,  $SD_c$ 为对照组标准差,  $SD_i$ 为处理组标准差,  $n_c$ 为对照组样本量,  $n_i$ 为处理组样本量, 即处理的重复数。

采用R软件Metafor软件包, 选择随机效应模型, 选择限制性最大似然法(REML)估计研究间方差, 计算每一组数据的效应值和95%置信区间(CI)。当任一效应值的95%置信区间(CI)与 $\ln R=0$ 重叠时, 认为该处理对结局指标无显著统计学意义, 否则, 认为该处理对结局指标具有显著统计学意义。

进行异质性检验: 对异质性Q值进行检验, 如果其 $P<0.05$ , 则引入后续解释变量即一些影响因素, 否则说明整体异质性小, 无需引入解释变量。

进行发表偏倚检验: 由于主要从发表的研究得出结论, 积极的研究更容易被发表, 所以过分强调积极性结果可能产生偏差, 必须对积极性结果可能得到优先发表的发表偏倚进行调查。本研究采用失安全系数法(Fail safe number,  $N$ )<sup>[15]</sup>进行发表偏倚检验, 即检验需要多少潜在的效应值不显著的

研究, 才能使某一研究结果的效应值变得不显著。如果失安全系数 $N>5K+10$ , 那么说明结论可靠, 偏倚性影响不大,  $K$ 为研究的个数。

## 2 结果

### 2.1 木霉防控枯萎病整体效果与发表偏倚检验

表1为分析获得的总体平均效应值、置信区间和效应值的显著性检验 $P$ 值, 平均效应值为 $-0.9248$ , 根据材料与方法中对数反应比的计算公式 $\ln R = \ln(X_i / X_c)$ 换算, 得到处理组发病率与对照组发病率平均比值约为0.40, 即施用木霉菌剂能显著减少枯萎病发病率, 平均防效约60%。对Meta分析总体异质性Q进行检验, 其 $P<0.0001$ , 说明异质性极强, 适合引入解释变量分析其来源。

采用失安全系数法对Meta整体分析结果进行发表偏倚检验, 结果显示失安全系数 $N=684460$ 。共 $K=147$ 组研究数据,  $5K+10=745$ , 所以 $N$ 远大于 $5K+10$ , 表明本研究的Meta分析结果较可靠, 受发表偏倚性影响不明显。

表1 木霉防控枯萎病的Meta分析整体结果

Table 1 Meta-analysis of fusarium wilt disease controlling effect of *Trichoderma*

MES	$k$	$P$	LCI	UCI	Q	$P_Q$
-0.925***	147	<0.0001	-1.031	-0.818	9408***	<0.0001

注: \*, \*\*, \*\*\*分别表示0.05、0.01、0.001的统计显著性水平; MES表示平均效应值;  $k$ 表示整体样本量;  $P$ 表示平均效应值的显著性检验值; Q表示整体异质性; LCI表示95%置信区间下限; UCI表示95%置信区间上限;  $P_Q$ 表示Q的显著性检验值。下同Note: \*, \*\*, \*\*\* indicates statistical significance levels at 0.05, 0.01 and 0.001, respectively; MES stands for mean effect size;  $k$  stands for number of samples;  $P$  for significance test of mean effect size; Q for heterogeneity; LCI for bottom of 95% confidence interval; UCI for ceiling of 95% confidence interval; and  $P_Q$  for significance test of Q. The same below

### 2.2 木霉防控枯萎病的影响因素

由于总体异质性Q值的检验值 $P<0.0001$ , 因此, 引入解释变量即影响因素进行下一步分析, 并显示出各影响因素的样本量、引起的异质性及其显著性检验结果(表2)。结果表明, 作物科类、施用方法、联合作用、气候类型和木霉形式这5类因素引起的异质性QM(即影响因素引起的异质性)较大, 显著性检验值 $P<0.05$ , 说明其对木霉防控枯萎病有显著影响; 试验类型、木霉种类、施用剂量和施用次数4类因素引起的异质性QM较小, 显著性检验值 $P>0.05$ , 说明此4类因素影响较小(表2)。

### 2.3 试验类型对木霉防控枯萎病效果的影响

结合图1与表2, 2个亚组的平均效应值和置信区间较相近, 表明试验类型对木霉防效影响不显著。2个亚组各自置信区间皆不与0重叠, 说明无论在盆栽或大田试验中, 木霉菌剂施用均能显著防控枯萎病。

### 2.4 作物科类对木霉防控枯萎病效果的影响

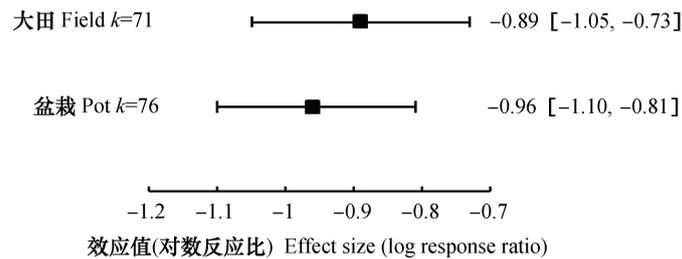
如表2和图2所示, 10个作物科类亚组的平均效应值和置信区间相差较大, 表明不同作物科类对木霉防控枯萎病效果的影响显著不同。菊科、兰科、蔷薇科的置信区间与0重叠, 说明在这3科作物中, 木霉对枯萎病不具有显著防控, 其余6科的置

表2 影响因素的异质性检验结果

**Table 2** Heterogeneity test (QM) of influencing factors

影响因素 Influencing factors	<i>k</i>	QM	<i>P</i>
试验类型 Type of experiment	147	0.36	0.5476
作物科类 Family of crop	147	39.38***	<0.0001
施用模式 Application mode	147	19.10**	0.0018
木霉种类 <i>Trichoderma</i> species	94	13.49	0.0610
联合作用 Combination	147	18.04***	<0.0001
施用剂量 Application rate	35	3.59	0.0582
施用次数 Application frequency	146	1.07	0.3007
木霉形式 <i>Trichoderma</i> form	146	12.54**	0.0057
气候类型 Climate condition	71	10.01*	0.0185

注: *k*表示每个影响因素的样本量; QM表示影响因素引起异质性; *P*为QM的显著性检验值 Note: *k* stands for number of samples of each influencing factor; QM for heterogeneity caused by influencing factors; and *P* for significance test of QM



注: 显示平均效应值和95%置信区间; *k*表示各亚组样本量。下同 Note: Mean effect size and 95% confidence interval are shown in the figure; *k* stands for number of samples of each sub-group. The same below

图1 不同试验类型下木霉施用的发病率效应值

Fig. 1 Fusarium wilt disease incidence controlling effect of *Trichoderma* relative to type of the experiment

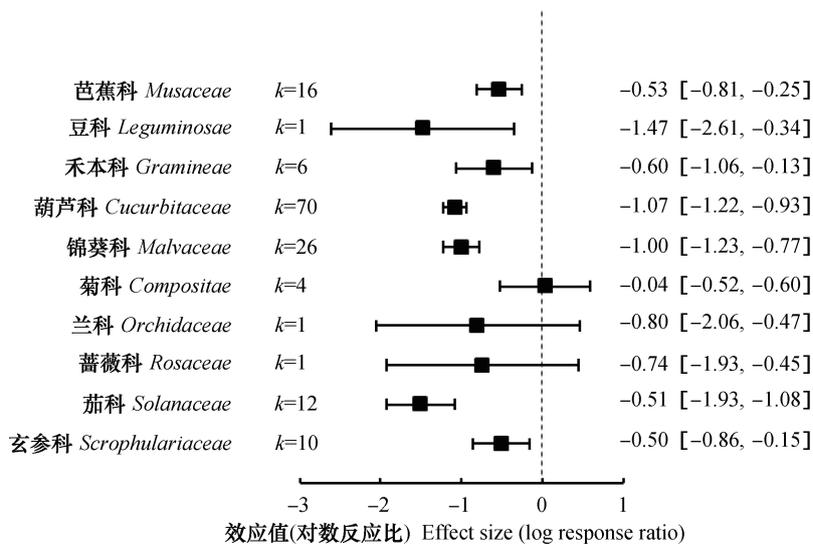


图2 不同作物科类中木霉施用的发病率效应值

Fig. 2 Fusarium wilt disease incidence controlling effect of *Trichoderma* relative to crop or to which family it belongs to

信区间不与0重叠,表明木霉对枯萎病的防效在这6科作物中有显著效果。

进行作物科类间的多重比较,表3为具有显著差异的作物科类间的比较结果,表明木霉对枯萎病

的防控效果在葫芦科、锦葵科、茄科中显著优于芭蕉科、玄参科和菊科,此外,豆科显著优于菊科,茄科优于锦葵科与禾本科,其余科间无显著性差异。

表3 作物科类因素多重比较的显著性检验结果

作物科类 Family of crop		QM	P
芭蕉科 <i>Musaceae</i>	葫芦科 <i>Cucurbitaceae</i>	11.52***	0.000 7
芭蕉科 <i>Musaceae</i>	锦葵科 <i>Malvaceae</i>	6.41*	0.011 3
芭蕉科 <i>Musaceae</i>	茄科 <i>Solanaceae</i>	14.15***	0.000 2
豆科 <i>Leguminosae</i>	菊科 <i>Compositae</i>	5.51*	0.018 9
禾本科 <i>Gramineae</i>	茄科 <i>Solanaceae</i>	8.02**	0.004 6
葫芦科 <i>Cucurbitaceae</i>	菊科 <i>Compositae</i>	14.38***	0.000 1
葫芦科 <i>Cucurbitaceae</i>	玄参科 <i>Scrophulariaceae</i>	8.66**	0.003 3
锦葵科 <i>Malvaceae</i>	菊科 <i>Compositae</i>	11.37***	0.000 7
锦葵科 <i>Malvaceae</i>	茄科 <i>Solanaceae</i>	4.29*	0.038 4
锦葵科 <i>Malvaceae</i>	玄参科 <i>Scrophulariaceae</i>	5.32*	0.021 1
菊科 <i>Compositae</i>	茄科 <i>Solanaceae</i>	18.69***	<0.000 1
茄科 <i>Solanaceae</i>	玄参科 <i>Scrophulariaceae</i>	12.70***	0.000 4

## 2.5 施用模式对木霉防控枯萎病效果的影响

如表2和图3所示, 6个施用模式亚组的平均效应值和置信区间相差较大。沾根处理的置信区间与0重叠, 说明木霉通过沾根法施用对枯萎病防控效果不显著, 穴施、拌土、种子处理、灌根及多种模式并用的处理置信区间不与0重叠, 表明通过这5种

模式对枯萎病有显著防控效果。

进行施用模式间的多重比较, 表4为具有显著差异的施用模式间的比较结果, 表明木霉通过穴施、拌土、多种并用的模式对枯萎病的防控效果显著优于沾根和灌根方法, 其余模式间无显著性差异。

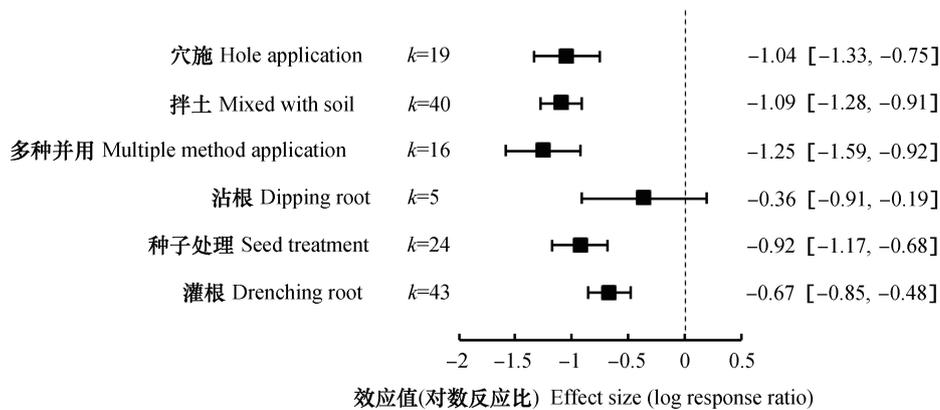


图3 不同施用模式下木霉施用的发病率效应值

Fig. 3 Fusarium wilt disease incidence controlling effect of *Trichoderma* relative to application mode

## 2.6 联合作用对木霉防控枯萎病效果的影响

如表2、图4所示, 2个亚组的平均效应值和置信区间有显著差异, 表明联合其他方法与否对木霉防控效果影响极显著。2个亚组各自置信区间皆不与0重叠, 说明无论与其他方法联合作用或单独作用, 木霉菌剂施用均能显著防控枯萎病, 且与其他方法如施用芽孢杆菌和土壤熏蒸剂等联合作用, 木霉对枯萎病的防效显著优于木霉单独作用。

## 2.7 木霉形式对木霉防控枯萎病效果的影响

如表2和图5所示, 4种木霉形式亚组的平均效应值和置信区间相差较大。4种木霉形式皆不与0重叠, 表明这4种形式的木霉对枯萎病均有显著防控效果。

进行木霉形式间的多重比较, 表5为具有显著差异的木霉形式间的比较结果, 表明木霉通过生物有机肥形式、固体菌剂与液体菌剂相结合的形式所达到的枯萎病防效, 显著优于液体菌剂形式。

表4 施用模式因素多重比较的显著性检验结果

**Table 4** Significance test of the factor of application mode in multiple comparison

施用模式 Application mode		QM	P
沾根 Dipping root	穴施 Pit application	4.60*	0.032 0
沾根 Dipping root	拌土 Mixing with soil	6.14*	0.013 2
沾根 Dipping root	多种并用 Multiple method application	7.44**	0.006 4
灌根 Drenching root	穴施 Hole application	4.54*	0.033 1
灌根 Drenching root	拌土 Mixing with soil	10.16**	0.001 4
灌根 Drenching root	多种并用 Multiple method application	9.16**	0.002 5

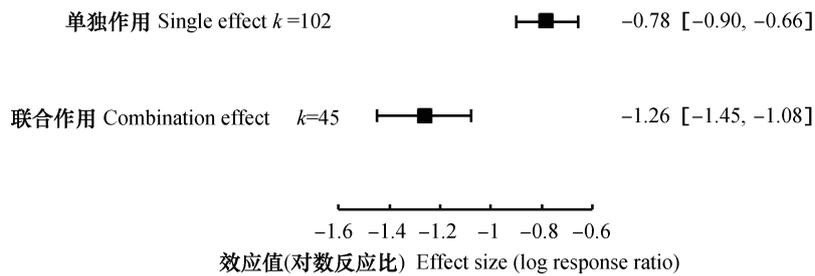


图4 联合作用下木霉施用的发病率效应值

Fig. 4 Fusarium wilt disease incidence controlling effect of *Trichoderma* relative to situations of combination

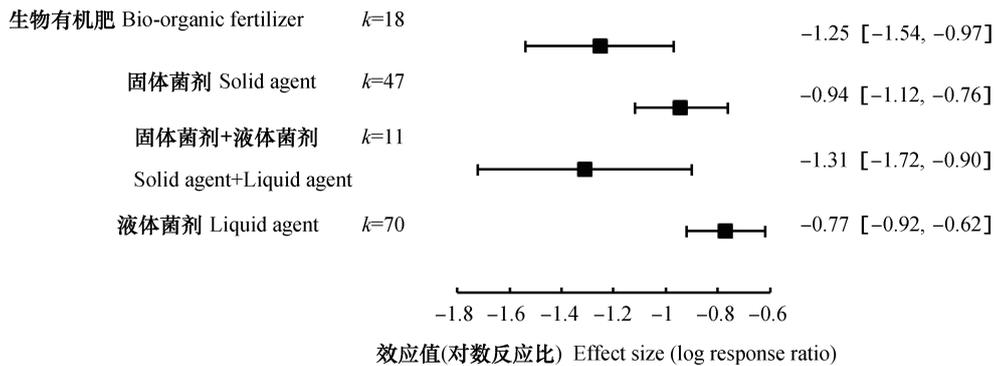


图5 不同木霉形式下木霉施用的发病率效应值

Fig. 5 Fusarium wilt disease incidence controlling effect of *Trichoderma* relative to form

表5 木霉形式因素多重比较的显著性检验结果

**Table 5** Significance test of the factor of form of *Trichoderma* in multiple comparison

木霉形式 <i>Trichoderma</i> forms		QM	P
生物有机肥 Biomanure	液体菌剂 Liquid agent	8.59**	0.0034
固体菌剂+液体菌剂 Solid agent + Liquid agent	液体菌剂 Liquid agent	5.82*	0.0159

2.8 气候类型对木霉防控枯萎病效果的影响

气候类型对于整体结果影响不显著,但在大田试验亚组中,其对木霉的防效有显著影响,在此呈现结果。图6结合表2可知,4个气候类型亚组的平均效应值和置信区间相差较大,表明气候类型对

木霉防控枯萎病效果影响显著。高山高原气候区木霉处理的置信区间与0重叠,表明在高山高原气候区,木霉对枯萎病无显著防控效果;温带大陆性气候区、温带季风气候区和亚热带季风气候区木霉处理的置信区间不与0重叠,表明在这3个区域中,木

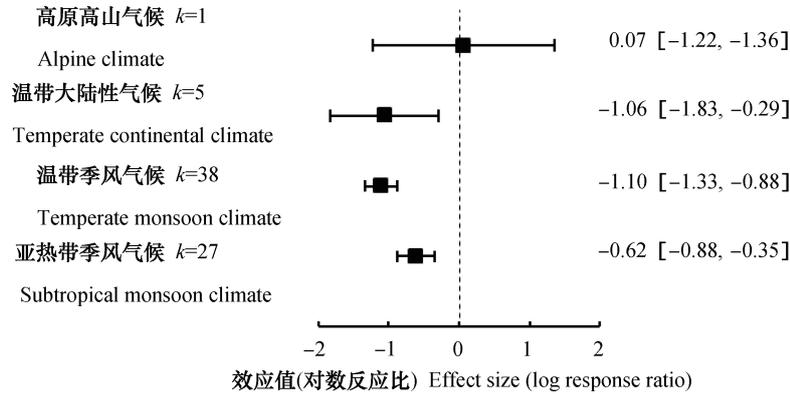


图6 不同气候类型下木霉施用的发病率效应值

Fig. 6 Fusarium wilt disease incidence controlling effect of *Trichoderma* relative to type of the climate where it is used

霉对枯萎病有显著的防控效果。

进行区域间的多重比较, 结果显示温带季风气候与亚热带季风气候间有显著差异, 其引起的异质性QM为7.678, QM的显著性检验P值为0.005 6, 木霉对枯萎病防控效果在温带季风气候区较亚热带季风气候区有更显著的效果, 其余任意两两间无显著性差异。

### 3 讨论

Meta分析整体结果显示木霉的施用对土传枯萎病具有显著的防控效果, 平均防效约为60%。纳入研究数据有147组, 且失安全系数检验所得N值较高, 认为此结果具有较强统计学意义<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 木霉防控枯萎病的非显著影响因素

本研究首先发现, 试验类型(盆栽和大田试验)对防控效果无显著影响。大量的功能微生物促进植物生长和/或防控土传病害的研究均首先利用盆栽试验初步评估效果, 再进一步通过田间试验获得确切促生和/或防病效应<sup>[16-17]</sup>。因此, 本研究表明, 在实验室内进行的木霉菌盆栽试验的结果可以比较一致地应用于大田试验中, 即木霉对枯萎病的生防效果不局限于小范围的实验室条件, 木霉适合被推广至实际农作物生产中。

施用剂量的差别对防控效果无显著影响。本研究中, 剂量因素的收集以cfu为统一的单位, 再分为每株cfu和每克土cfu, 分析后发现均无显著影响。值得注意的是, 本次研究收集的文章中, 相当部分涉及剂量因素, 但其中很多未采用统一标准cfu, 而是直接描述施用某种木霉制剂量的大小,

而该种木霉制剂中木霉的具体含量却未提及, 由此不能构建一致的标准, 从而无法进行研究间的比较。因此, 由剂量造成的异质性确实存在, 却由于无法统一标准而不能被很好地解释, 数据缺失比较严重。Wu等<sup>[11]</sup>研究显示, 在一定范围内, 防效随着木霉生物有机肥剂量的上升而有所上升, 超过此范围, 观察到防效无显著上升。综上, 研究中有有关剂量的描述应该进一步具体和规范, 且剂量与防治效果间关系有待进一步研究。

#### 3.2 木霉防控枯萎病的显著影响因素

不同施用模式对防控效果有显著影响。此次收集数据中沾根处理仅有2个研究的5组数据, 数据量较小, 在此不做讨论。其余模式均有10组及以上数据, 结果较为可信。多种施用模式并用、穴施及拌土的施用方法防控效果较优, 种子包衣或是拌种及灌根法也具有一定的防治效果, 其中, 穴施及拌土模式中, 以木霉生物有机肥的研究较多<sup>[10-12]</sup>, 该应用模式依据了生物肥料的形式、试验类型和作物特性, 因此均取得了优异的防控效果。

木霉形式对防控效果有显著影响。4亚组样本量皆大于10, 具有一定可信度, 液体菌剂加固体菌剂及生物有机肥形式的木霉对枯萎病防效更好, 固体菌剂和液体菌剂单独施用也具有一定防效, 但液体菌剂防效最差。不同的施用方法及形式对木霉的生长及存活能力的影响有差异, 导致防控枯萎病效果不同。如袁玉娟等<sup>[10]</sup>采用木霉与有机肥进行固体发酵得到生物有机肥, 为木霉菌在土壤中的定殖提供了良好的条件, 其防治效果就优于液体灌根等仅施用单纯菌剂的方式。此外, 利用根际有益微生物防控土传病害、提高作物产量已成为热点, 但单

独施用功能微生物常常导致功能微生物难以有效定殖和活力低等问题,难以取得优异的效果<sup>[18]</sup>。因此,探索合适的木霉形式,尤其是研究外源有机添加物的辅助作用,对于其防控枯萎病效果的提高具有重要意义。

作物科类对防控效果有显著影响。其中,豆科、禾本科、菊科、兰科和蔷薇科样本量皆小于10,可信度不高,在此不做讨论。木霉防效在茄科、葫芦科和锦葵科作物中优异,其中,对茄科作物防效最优,在玄参科与芭蕉科中的防效略次,说明番茄、辣椒、棉花、黄瓜、西瓜、苦瓜和甜瓜等作物,对木霉防控枯萎病的响应优异,而地黄和香蕉等作物响应则不够好。可能是因为木霉防病机理中有与植物直接相关的部分,如木霉可释放代谢产物,刺激植物生长并诱发植物局部和系统防御反应,增强防御酶系活性如苯丙氨酸解氨酶(PAL)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和多酚氧化酶(PPO)等,使植物自身对病原菌侵染产生强效的防卫反应<sup>[19]</sup>,还能产生植物生长调节物质如吲哚乙酸(IAA)等<sup>[20]</sup>,以及协助植物对土壤养分的吸收利用<sup>[21]</sup>,其共同特点为木霉与植物直接产生良好的联系,从而达到抑病效果,而不同作物由于其生理结构的不同,导致这种防效也会随作物不同而出现差异。

联合其他方式对防控效果有显著影响,结果符合预期。不同手段的联合,能弥补单个因子抗病的局限性,取得更好的防控效果。徐韶等<sup>[9]</sup>的研究显示,木霉与枯草芽孢杆菌联合施用较木霉单施具有更显著的防控效果;Wu等<sup>[11]</sup>研究表明,木霉与多黏芽孢杆菌联合施用,能够有效防控西瓜枯萎病。因此,未来需进一步加强以木霉为核心,含复合微生物菌群的新型生物肥料防病效应的研究,同时需要加强与其他防控方式如熏蒸等的联合方面的研究。

气候类型对防控效果有显著影响(大田试验)。由于高山高原气候区仅有1个研究和1组数据,可信度不高,不做讨论。木霉对枯萎病的防效,在温带季风气候区较在亚热带季风气候区要高,在温带大陆性气候区也具有一定防效。李云等<sup>[22]</sup>研究显示,土壤微生物活性和多样性与水温条件呈现正相关;田连生和陈菲<sup>[23]</sup>的研究显示,木霉在25℃生长量最好,25℃以上呈现逐渐降低

的趋势,推测亚热带较温带偏高的气温影响了木霉的存活或者功能的发挥。在不同的气候和土壤条件下,木霉代谢特征不同,有关气候条件对木霉防控枯萎病效果的影响机制有待进一步探索。

在各个影响因素的分析中,由于木霉生防过程本身复杂,导致异质性来源也复杂。本研究中部分因素并未对整体异质性进行很好地解释。受到研究间诸如研究环境、人为差异等诸多不可控制和无法收集的因素影响,大部分异质性无法有效解释,能否找寻到合适的解释变量是以后研究的关键。尽管如此,Meta整体分析结果依然表明,木霉对枯萎病有显著的防控效果,这一结论具有很高的外部真实性。综上,认为此次结果能够为农业生产实际和未来研究内容提供一定的参考,对于如何有效增强木霉生防枯萎病效果及探索其防控机制具有一定的指导意义。

## 4 结 论

基于Meta分析方法对木霉防控枯萎病效果的整合分析与评价表明,木霉的施用整体上对枯萎病具有显著的防控效果,盆栽试验的结果可以比较一致地应用于大田试验中。作物科类、木霉形式、施用模式、联合作用和气候类型(大田)这5类因素对防控效果有显著影响。施用木霉菌在茄科、葫芦科和锦葵科作物上取得优异效果,且茄科作物效果最优,这表明木霉比较适用于防控辣椒、番茄、茄子和黄瓜等作物枯萎病;采用拌土、穴施和多种模式并用均能取得较优效果;生物有机肥形式和固体菌剂与液体菌剂联合形式为首选形式;相比于亚热带季风气候区,木霉更适于在温带季风气候区的大田进行施用。基于所收集文献,试验类型、木霉种类、木霉菌剂施用剂量和木霉菌剂施用次数对结果无显著影响。整体表明,木霉菌适合被推广至实际农作物生产中防控枯萎病,并可通过控制一些因素,最大化其防治效果,本研究结果预计能为田间高效应用木霉菌防控土传枯萎病提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 钟书堂,沈宗专,孙逸飞,等.生物有机肥对连作蕉园香蕉生产和土壤可培养微生物区系的影响.应用生态学报,2015,26(2):481—489

- Zhong S T, Shen Z Z, Sun Y F, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer on banana production and cultural microflora of bulk soil in orchard with serious disease incidence (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (2): 481—489
- [ 2 ] Contrerascornejo H A, Macíasrodríguez L, Delval E, et al. Ecological functions of *Trichoderma* spp. and their secondary metabolites in the rhizosphere: Interactions with plants. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, 92 (4): fiw036
- [ 3 ] 邹佳迅, 范晓旭, 宋福强. 木霉 (*Trichoderma* spp.) 对植物土传病害生防机制的研究进展. *大豆科学*, 2017 (6): 970—977
- Zou J X, Fan X X, Song F Q. Biocontrol mechanism of *Trichoderma* spp. against soilborn plant disease (In Chinese). *Soybean Science*, 2017 (6): 970—977
- [ 4 ] 顾小龙, 陈巍, 蔡枫, 等. 配施木霉微生物肥对连作黄瓜的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (5): 1296—1305
- Gu X L, Chen W, Cai F, et al. Effect of *Trichoderma* biofertilizer on continuous cropping cucumber cultivation with reduced rates of chemical fertilizer application (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5): 1296—1305
- [ 5 ] Yang J, Li B, Liu S W, et al. Fermentation of Foc TR4-infected bananas and *Trichoderma* spp. Genetics and Molecular Research, 2016, 15 (4): doi: 10.4238/gmr15048494
- [ 6 ] 纪明山, 王英姿, 程根武, 等. 西瓜枯萎病拮抗菌株筛选及田间防效试验. *中国生物防治学报*, 2002, 18 (2): 71—74
- Ji M S, Wang Y Z, Cheng G W, et al. Selection of antagonistic strains against watermelon wilt and their biocontrol efficiency (In Chinese). *Chinese Journal of Biological Control*, 2002, 18 (2): 71—74
- [ 7 ] 闫敏, 李磊, 霍晓兰, 等. 利用木霉防治地黄枯萎病的研究. *山西农业科学*, 2009, 37 (4): 70—72
- Yan M, Li L, Huo X L, et al. Study on control of *Rehmannia fusarium* wilt by *Trichoderma pers* (In Chinese). *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2009, 37 (4): 70—72
- [ 8 ] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于Meta-analysis的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析. *农业工程学报*, 2015, 31 (24): 1—7
- Zhao A Q, Wei X J, Zhu M. Meta-analysis on impact of plastic film on potato yield in China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (24): 1—7
- [ 9 ] 徐韶, 庄敬华, 高增贵, 等. 内生细菌与木霉复合处理诱导甜瓜对枯萎病的抗性. *中国生物防治学报*, 2005, 21 (4): 254—259
- Xu S, Zhuang J H, Gao Z G, et al. Induced resistance to *Fusarium oxysporum* in melon treated with combination of *Trichoderma viride* and entophytic bacteria *Bacillus subtilis* (In Chinese). *Chinese Journal of Biological Control*, 2005, 21 (4): 254—259
- [ 10 ] 袁玉娟, 胡江, 凌宁, 等. 施用不同生物有机肥对连作黄瓜枯萎病防治效果及其机理初探. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (2): 372—379
- Yuan Y J, Hu J, Ling N, et al. Effects and mechanisms of application with different bio-organic fertilizers in controlling *Fusarium* wilt of cucumber (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (2): 372—379
- [ 11 ] Wu H S, Yang X N, Fan J Q, et al. Suppression of *Fusarium* wilt of watermelon by a bio-organic fertilizer containing combinations of antagonistic microorganisms. *Biocontrol*, 2009, 54 (2): 287—300
- [ 12 ] Zhang N, He X, Zhang J, et al. Suppression of fusarium wilt of banana with application of bio-organic fertilizers. *Pedosphere*, 2014, 24 (5): 613—624
- [ 13 ] DeMalach N, Zaady E, Kadmon R. Contrasting effects of water and nutrient additions on grassland communities: A global meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26 (8): 983—992
- [ 14 ] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80 (4): 1150—1156
- [ 15 ] Rosenthal R. The file drawer problem and tolerance for null results. *Psychological Bulletin*, 1979, 86 (3): 638—641
- [ 16 ] Wang B B, Shen Z Z, Zhang F G, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* strain W19 can promote growth and yield and suppress fusarium wilt in banana under greenhouse and field conditions. *Pedosphere*, 2016, 26 (5): 733—744
- [ 17 ] Ding C, Shen Q, Zhang R, et al. Evaluation of rhizosphere bacteria and derived bio-organic fertilizers as potential biocontrol agents against bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) of potato. *Plant and Soil*, 2013, 366: 453—466
- [ 18 ] 赵政, 陈巍, 王欢, 等. 木霉微生物肥与减量化肥配施对番茄产量、品质及土壤肥力的影响. *土壤学报*, 2018, 55 (5): 1243—1253
- Zhao Z, Chen W, Wang H, et al. Effects of bio-manure combined with chemical fertilizer reduced in

- application rate on soil fertility and yield and quality of tomato (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (5): 1243—1253
- [ 19 ] 林志伟, 于春生, 李海燕, 等. 哈茨木霉抗多菌灵突变株对大豆菌核病的诱导抗性生理. *大豆科学*, 2016, 35 (3): 472—476  
Lin Z W, Yu C S, Li H Y, et al. Induced resistance physiological on stem rot of soybean by carbendazim resistance mutant strain of *Trichoderma harzinaum* (In Chinese). *Soybean Science*, 2016, 35 (3): 472—476
- [ 20 ] Contrerascornejo H A, Macíasrodríguez L, Cortéspenagos C, et al. *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 2009, 149 (3): 1579—1592
- [ 21 ] Li Y T, Hwang S G, Huang Y M, et al. Effects of *Trichoderma asperellum*, on nutrient uptake and Fusarium wilt of tomato. *Crop Protection*, 2017, 110: 275—282
- [ 22 ] 李云, 孙波, 李忠佩, 等. 不同气候条件对旱地红壤微生物群落代谢特征的长期影响. *土壤*, 2011, 43 (1): 60—66  
Li Y, Sun B, Li Z P, et al. Long-term effects of different climatic conditions on microbial metabolic properties in red soil (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (1): 60—66
- [ 23 ] 田连生, 陈菲. 木霉对多菌灵的生物降解特性研究. *土壤学报*, 2009, 46 (6): 1127—1131  
Tian L S, Chen F. Carbendazim biodegradation characteristics of *Trichoderma* (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1127—1131
- 报, 2005, 21 (3): 206—208
- [ 6 ] 陆楚月, 马艳, 王巧, 等. 绿色木霉TV41对尖孢镰刀菌FW0在西瓜植株空间分布和枯萎病防控效果的影响. *微生物学通报*, 2015, 42 (11): 2159—2167
- [ 7 ] 莫贱友, 郭堂勋, 胡风云, 等. 广西香蕉枯萎病防治试验. *中国热带农业*, 2012 (5): 50—53
- [ 8 ] 田连生, 陈菲. T2-2菌株对多菌灵的降解特性及生物修复试验. *微生物学报*, 2009, 49 (7): 925—930
- [ 9 ] 田连生, 王伟华, 石万龙, 等. 木霉对尖孢镰刀菌的拮抗机制及生防效果研究. *植物保护*, 2001, 27 (4): 47—48
- [ 10 ] 田连生, 张根伟, 黄亚丽, 等. 木霉菌剂防治番茄枯萎病效果. *现代化农业*, 2002 (10): 14—14
- [ 11 ] 王伟, 赵谦, 杨微. 木霉对土传病原尖孢镰刀菌的拮抗作用. *中国生物防治学报*, 1997, 13 (1): 46—47
- [ 12 ] 王正明, 谢玉凤, 陈天平. 木霉菌应用不同载体防治地黄枯萎病的效果. *湖北植保*, 2016 (2): 26—27
- [ 13 ] 肖荣凤, 刘波, 唐建阳, 等. 哈茨木霉FJAT-9040生防菌剂固体发酵及其对苦瓜枯萎病的防治效果. *中国生物防治学报*, 2015, 31 (4): 508—515
- [ 14 ] 严叔平. 哈济木霉防治西瓜枯萎病试验初报. *中国瓜菜*, 1999 (2): 18—18
- [ 15 ] Yang H T, Tang W H, Maarten, et al. Efficacy of isolates and formulation of *Trichoderma* spp. against cotton fungal diseases. *Shang Science*, 2005, 18 (3): 85—90
- [ 16 ] 燕嗣皇, 陆德清, 杨雨环. 木霉防治辣椒枯萎病应用技术研究. *贵州农业科学*, 1999, 27 (5): 1—4
- [ 17 ] 杨合同, 唐文华, 李纪顺, 等. 绿色木霉LTR-2菌株的紫外线诱变改良. *中国生物防治学报*, 2004, 20 (3): 182—186
- [ 18 ] 姚贤民. 利用木霉菌防治草坪镰刀枯萎病研究. *河南农业科学*, 2013, 42 (5): 123—127
- [ 19 ] 姚彦坡, 王雅玲, 吕国忠. 木霉对草坪上2种重要土传病害生防效果的研究. *草业科学*, 2007, 24 (8): 96—99
- [ 20 ] 尹淑丽, 张丽萍, 张根伟, 等. 生防菌防治黄瓜枯萎病的协同作用研究. *北方园艺*, 2012 (7): 151—155
- [ 21 ] 张丽荣, 康萍芝, 杜玉宁, 等. 木霉制剂对西瓜枯萎病的田间防治效果. *北方园艺*, 2011 (17): 148—149
- [ 22 ] 赵国其, 林福呈, 陈卫良, 等. 绿色木霉对西瓜枯萎病苗期的控制作用. *浙江农业学报*, 1998 (4): 206—209
- [ 23 ] 程莹, 白寿发, 庄敬华, 等. 木霉菌多功能生防菌剂对瓜类枯萎病的防效研究. *现代农业科技*, 2010 (23): 157—158
- [ 24 ] 黄艳青, 刘学军, 徐韶, 等. 木霉菌对甜瓜枯萎病的防治. *农业科技与装备*, 2009 (1): 31—32

## 附 录:

- [ 1 ] 曾华兰, 叶鹏盛, 李琼芳. 中药材土传病害拮抗木霉的筛选与应用初探. *云南农业大学学报 (自然科学版)*, 2002, 17 (4): 386—388
- [ 2 ] 黄艳青, 庄敬华, 高增贵, 等. 木霉菌诱导甜瓜抗枯萎病相关防御反应酶系的研究. *沈阳农业大学学报*, 2005, 36 (5): 546—549
- [ 3 ] 康萍芝, 张丽荣, 沈瑞清, 等. 哈茨木霉制剂对设施连作番茄根际土壤微生物的生态效应及防病作用. *农药*, 2013, 52 (2): 128—131
- [ 4 ] 刘爱媛. 用木霉防治豇豆土传病害. *中国生物防治学报*, 1992, 8 (4): 188—188
- [ 5 ] 柳春燕, 郭敏, 林学政, 等. 拟康氏木霉和枯草芽孢杆菌对黄瓜枯萎病的协同防治作用. *中国生物防治学报*, 2005, 21 (3): 206—208

- [25] 林伟, 黎起秦, 彭好文, 等. 拮抗菌防治西瓜枯萎病的试验. 基因组学与应用生物学, 2002, 21(4): 242—244
- [26] 田连生, 李书生, 史延茂, 等. 利用玉米秸秆制备生物杀菌剂的研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 59—61
- [27] 吴海云, 高增贵, 赵世波, 等. 防治甜瓜枯萎病木霉菌REMI变异株筛选. 中国植保导刊, 2007, 27(7): 5—7
- [28] 吴祥, 姚克兵, 吉沐祥, 等. 句容地区草莓枯萎病原菌的分离鉴定及田间防治. 江苏农业学报, 2015(4): 764—770
- [29] 杨春林, 席亚东, 刘波微, 等. 哈茨木霉T-h-30对几种蔬菜的促生作用及病害防治初探. 西南农业学报, 2008, 21(6): 1603—1607
- [30] 杨合同, 唐文华, 王加宁, 等. 几丁质和杀菌剂对生物防治菌生长及其防治棉花病害效果的影响. 植物病理学报, 2002, 32(4): 326—331
- [31] 张称英, 汪祖国, 卫勤, 等. 交大木霉菌改良菌株“交大农威”防治西瓜枯萎病示范试验简报. 上海农业科技, 2012(5): 116—116
- [32] 张丽荣, 马建华, 杜玉宁. 不同生物制剂对黄瓜土壤微生物数量及发病率和产量的影响. 北方园艺, 2012(21): 115—117
- [33] 朱荣杰, 赵贯飞, 杨斌, 等. 微生物菌肥对日光温室西瓜成活率、发病率和产量的影响. 中国农学通报, 2017, 33(12): 88—91
- [34] 庄敬华, 高增贵, 杨长城, 等. 绿色木霉菌T23对黄瓜枯萎病防治效果及其几种防御酶活性的影响. 植物病理学报, 2005, 35(2): 179—183
- [35] 罗静静, 刘小龙, 李克梅, 等. 几种微生物菌剂对连作棉田枯黄萎病的防病效应. 西北农业学报, 2015, 24(7): 136—143
- [36] 杜婵娟, 付岗, 潘连富, 等. 木霉制剂对土壤微生物数量和香蕉枯萎病的影响. 西南农业学报, 2013, 26(3): 1030—1033
- [37] 王玉全, 吴凯, 程莹. 木霉菌与内生细菌防治甜瓜枯萎病的协同增效作用研究. 安徽农业科学, 2012, 40(14): 8113—8115
- [38] Cao Y, Xu Z H, Ling N, et al. Isolation and identification of lipopeptides produced by *B. subtilis* SQR 9 for suppressing *Fusarium* wilt of cucumber. *Scientia Horticulturae*, 2012, 135: 32—39
- [39] Qiu M, Zhang R F, Xue C, et al. Application of bio-organic fertilizer can control *Fusarium* wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(7): 807—816
- [40] Xiong W, Guo S, Jousset A, et al. Bio-fertilizer application induces soil suppressiveness against *Fusarium* wilt disease by reshaping the soil microbiome. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 114: 238—247
- [41] Zhang F G, Zhu Z, Yang X M, et al. *Trichoderma harzianum* T-E5 significantly affects cucumber root exudates and fungal community in the cucumber rhizosphere. *Applied Soil Ecology*, 2013, 72: 41—48

## Evaluation of Effect of *Trichoderma* Controlling *Fusarium* Wilt Disease and Its Influencing Factors with Meta-analysis in China

CAO Yifan SHEN Zongzhan LIU Shanshan JIANG Xueting LI Rong<sup>†</sup> SHEN Qirong

(College of Resources and Environmental Sciences/ Jiangsu Key Laboratory of Solid Organic Waste Utilization/ Educational Ministry Engineering Center of Resource-saving fertilizers / Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract** 【Objective】Currently, numerous researchers and farmers in China are steadily realizing that *Trichoderma* can not only function to promote plant root growth, but also protect plant roots from infection of soil-borne pathogens. So they focus their researches on using different species of *Trichoderma* to inhibit fusarium wilt disease in different crops and their approaches. However, it is still not very clear how effective *Trichoderma* is to control the disease and what are its influencing factors. In this study based on the researches so far done in China, the Meta-analysis method was adopted to evaluate effectiveness of the control and define its influencing factors. 【Method】Based on the papers published in Chinese and

in English as well in China addressing the use of *Trichoderma* to control fusarium wilt disease of different crops, this study used the Meta analysis method to evaluate fusarium wilt disease controlling effect of *Trichoderma* and to analyze impacts of a variety of factors on effectiveness of the control. 【 Result 】 Results show that generally speaking, *Trichoderma* demonstrates a remarkable fusarium wilt disease controlling effect and its biological control effect reaches more than 60%. Both field experiment and pot experiment were carried out with similar outcomes. Crop family, *Trichoderma* form, application mode, climate type (field experiment) and usage in combination with other disease control strategies, etc. were factors significantly affecting effectiveness of the control. To be more specific, application of *Trichoderma* to crops of *Solanaceae*, *Cucurbitaceae* and *Malvaceae* showed the most significant effect; *Trichoderma* mixed with soil for application, applied in pits and applied in multi-ways simultaneously was higher in effect than that applied in a single way; application of *Trichoderma* in the form of biomanure or mixture of solid and liquid fungal agents was the first option; and its effect would be more significant when used in areas under the temperate monsoon climate than when used in areas under the subtropical monsoon climate. However, *Trichoderma* species, experiment type, application rate and application timing was not found to have much impacts on its disease controlling effect in the field and pot experiments. 【 Conclusion 】 Therefore, in order to more effectively control fusarium wilt disease in the field with *Trichoderma*, the influencing factors discussed above should be taken into account properly. The findings of this study are also expected to be of some reference value to farmers in practical and efficient application of *Trichoderma* to control soil-borne fusarium wilt disease in the field.

**Key words** Fusarium wilt; *Fusarium oxysporum*; *Trichoderma*; bio-control; Meta-analysis

(责任编辑: 陈荣府)