叶面喷施枯草芽胞杆菌 XF-1 防治大白菜根肿病

何朋杰[1#]， 崔文艳[1#]， 何鹏飞[1,2]， 袁 海[1,2]， 李兴玉[1,2]， 吴毅歆[1,2]， 何月秋[1,2*]

(1. 云南农业大学，昆明 650201；2. 微生物菌种筛选与应用国家地方联合工程研究中心，昆明 650217)

摘要 为了建立简易、有效的根肿病生防体系，本研究采用浇灌和喷施枯草芽胞杆菌 XF-1 的绿色荧光蛋白标记菌株 XF-1-*gfp*，测定其在大白菜植株内的定殖能力，并用野生型菌株 XF-1 发酵液研究其防治根肿病和挽回产量效果。结果表明，叶面喷施 XF-1-*gfp* 发酵液后，标记菌在大白菜根、茎、叶等组织内的密度呈现出“先上升后下降最后趋于平稳”的趋势，最终稳定在约 10^3 cfu/g 组织；盆栽试验结果表明，与空白对照相比，所有处理发病率和病情指数均显著下降，喷施 XF-1 发酵液后最佳防治效果为 56.4%，浇灌化学杀菌剂 10%氰霜唑悬浮剂 2 000 倍液及 1×10^7 cfu/mL 的 XF-1 发酵液防效分别为 78.6%与 70.7%。大田试验结果表明，喷施 XF-1 发酵液后防治效果达 52.6%，与浇灌化学杀菌剂 10%氰霜唑悬浮剂(64.6%)及 XF-1 发酵液(74.0%)相比无显著差异。此外，与空白对照、浇灌 10%氰霜唑悬浮剂及 XF-1 发酵液相比，喷施 XF-1 发酵液后大白菜单株产量分别增加了 74.0%、35.1%及 23.6%。试验结果表明叶面喷施 XF-1 发酵液是一种有效的防控大白菜根肿病及增产增收的方法。

关键词 根肿病； 枯草芽胞杆菌 XF-1； 氰霜唑； 病害管理； 土传病害； 生物防治

中图分类号： S 476 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2018103

Control of cabbage clubroot by foliar-spaying with *Bacillus subtilis* XF-1

HE Pengjie[1], CUI Wenyan[1], HE Pengfei[1,2], YUAN Hai[1,2], LI Xingyu[1,2], WU Yixin[1,2], HE Yueqiu[1,2]

(1. *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*; 2. *National and Local Joint Engineering Research Center for Screening and Application of Microbial Strains*, *Kunming* 650217, *China*)

Abstract To establish an effective and simple biocontrol management system in the field, the colonization ability of XF-1 was tested in Chinese cabbage by drenching and spraying XF-1-*gfp* and clubroot control and yield recovery effects were studied by drenching and spraying the wild strain XF-1 in the pot and field experiments. The results showed that its population in root, stem and leaf of cabbage after foliar-spraying had a rising trend first, then decreasing and leveling off, and finally the colonization density kept at 10^3 cfu/g tissues. The incidence rate and disease index had a significant decline compared to the negative control in the pot experiment with 56.4% of control effect by spraying XF-1, 78.6% and 70.7% by drenching 2 000 times dilution of cyazofamid and 1×10^7 cfu/mL of XF-1. The disease control effects were 52.6%, 64.6% and 74.0%, respectively, in the field experiment without significant difference. Moreover, spraying XF-1 increased yield by 70.4%, 35.1% and 23.6% compared with the negative control, drenching cyazofamid and XF-1, respectively. This study suggested that foliar-spray of XF-1 might be an effective way for controlling clubroot and increasing Chinese cabbage yield.

Key words clubroot disease; *Bacillus subtilis* XF-1; cyazofamid; disease management; soil-borne disease; biocontrol

十字花科根肿病是由芸薹根肿菌 *Plasmodiophora brassicae* Woronin 侵染所引起的一种世界性土传病害，尤其在欧洲、北美和中国的西南、东南及华中地区危害严重[1-2]。近年来国内根肿病发病面积急剧增加，严重危害大白菜、油菜等重要蔬菜、油料作物的产量与品质[3]，发生面积占十字花科作物总种植面积的 1/3 以上，严重发病区域损失可达 2/3 以上，甚至完全绝收[4]。芸薹根肿菌属于活体营养专性寄生菌，休眠孢子在土壤中存活可达十几年，田间土壤一旦被污染，就不再适宜种植十字花科作物[5]。

收稿日期： 2018-03-07 **修订日期**： 2018-04-03
基金项目： 国家自然科学基金(31560503)；云南农业大学自然科学青年基金(2016ZR02)；国家公益性行业(农业)科研专项(201003029)
* 通信作者 E-mail：ynfh2007@163.com
# 为并列第一作者

在田间环境下防控根肿病极其困难,培育抗病品种很多时候是对抗根肿病最好的选择,但是我国主栽大白菜品种对根肿病的抗病性并不理想[6],化学防治因其对环境和农产品安全问题难以成为首选,所以生物防治已成为经济有效的防控手段之一。

枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis* XF-1(CGMCC No. 2357)(下称 XF-1)分离自根肿病重病田的大白菜根际土壤,对十字花科根肿病有良好的生防效果,应用潜力巨大[7]。目前有关 XF-1 及其他生防菌防治根肿病的主要施用方法是浇灌、浸种和包衣等[2,8-9],国内外尚无使用叶面喷施生防菌株来防治根肿病这类根部病害的报道。为了研究喷施 XF-1 菌株对根肿病的防治效果及相关机制,进一步为应用提供试验依据,本文就叶面喷施后 XF-1 在植株内的定殖、盆栽防治根肿病条件优化和大田防效验证进行了初步研究。

1　材料与方法

1.1　材料

供试杀菌剂:10%氰霜唑悬浮剂(科佳),浙江金牛石原化学有限公司产品。

供试菌株及大白菜:枯草芽胞杆菌 XF-1 和 XF-1 的绿色荧光蛋白(GFP)标记菌株 XF-1-*gfp*(下称 XF-1-*gfp*)均系本实验室自有知识产权保存菌株(−80℃)。根肿病样本来自云南省昆明市阿子营镇,−20℃保存备用。对十字花科根肿病高感的大白菜品种'青岛 83-1'种子(生长期 60 d)购自昆明市农贸市场。

1.2　方法

1.2.1　接种体与 XF-1 发酵液的制备

参考 McGrann 等[10]的方法制备根肿菌休眠孢子悬浮液,使用磷酸盐缓冲液(pH 6.2)调整孢子浓度至 1×10^8 个/mL 保存于 4℃冰箱备用。

分别挑取 XF-1 和 XF-1-*gfp* 单菌落于 LB 与含 10 μg/mL 氯霉素的 LB 液体选择性培养基中,37℃、170 r/min 的条件下振荡培养 48 h,使用涂板梯度稀释法检测菌落数量后调整至 1×10^8 cfu/mL 备用。

1.2.2　枯草芽胞杆菌在大白菜根围和植株内的动态监测与回收

挑取 XF-1-*gfp* 单菌落于 LB(含 10 μg/mL 氯霉素)液体选择性培养基中振荡培养 72 h 后于 12 000 r/min 的条件下室温离心 4 min,弃上清收集菌体,使用等体积的无菌双蒸水重悬菌体,相同条件下再离心 1 次,弃上清并使用 PBS 缓冲液(pH 7.0)重悬收集的菌体至 1×10^7 cfu/mL,保存备用。

将无菌自然土混匀分装入 21 cm×21 cm 的营养钵内,将健康饱满的大白菜种子表面消毒[11]后播种于营养钵中每盆 7 粒。出苗 7 d 后,每盆保留长势一致的大白菜幼苗 2 株作为试验材料,分别采用浇灌和喷施的方法接种枯草芽胞杆菌菌体悬浮液。浇灌:每盆均匀浇灌 100 mL XF-1-*gfp* 的重悬液,浇灌时须保持土壤浸润但不能有水从钵底流出;喷施:先取适量的无菌吸水纸轻柔地包裹住幼苗茎基部至完全覆盖盆栽土壤,然后用无菌棉球蘸取 XF-1-*gfp* 的重悬液轻轻擦拭大白菜幼苗的全部叶片表面,须完全润湿但不能有液滴滴下,5 min 后小心移除吸水纸。本试验同时设立野生型 XF-1 和无菌水两个处理,每个处理设置 3 个重复。

在处理后 1、3、5、7、10、15、25、35、45 d 分别取样,结合选择性培养与光电折射仪,采用梯度稀释涂板法回收监测标记菌在大白菜的根际、根表、根、茎以及叶的定殖数量[12-13]。

1.2.3　盆栽防病试验

试验于 2015 年 5 月至 9 月在云南省微生物菌种筛选与应用发酵工程中心室外进行。将根肿菌孢子悬浮液拌入无菌土内作为盆栽土,孢子终浓度为 1×10^5 个/g 土,装入营养钵(21 cm×21 cm)内浇足底水,将健康饱满的大白菜种子表面消毒后播种于上述营养钵中每盆 7 粒。待大白菜出苗后按照以下 6 种方式处理:空白对照,每盆浇灌 100 mL 清水;化学杀菌剂处理,分别于出苗后 7、14 d 每盆浇灌 100 mL 2 000倍的 10%氰霜唑悬浮剂;T1,分别于出苗后 1、4、7、10 d 每盆浇灌 100 mL XF-1 发酵液(1×10^7 cfu/mL);T2,分别于出苗后 1、3、5、7、9 d 使用小型喷雾器喷施一定量的 XF-1 发酵液(1×10^7 cfu/mL)至幼苗叶片完全润湿,液滴不下落为宜;T3,分别于 1、4、7、10、13 d 喷施 XF-1 发酵液;T4、T5 分别与 T2、T3 的处理方式类似,但喷施次数减少为 4 次。每个处理种植 10 盆,每盆保苗 3 株。

出苗 42 d 后采收大白菜,将所有大白菜小心拔起,用清水冲洗干净后统计发病率、病情指数、防治效果[11]、大白菜植株地上部鲜重,并计算增产率。

大白菜根肿病的分级标准按发病程度分为 0～5 级[14]。0 级:根部无肿瘤;1 级:大部分根系健康,

仅侧根有少量细小肿瘤；2 级：肉眼可见主根和侧根肿瘤，但肿瘤小；3 级：主根肿瘤明显但依旧有大量健康侧根存在；4 级：主根肿瘤明显，少量健康侧根存在，地上部出现萎蔫症状；5 级：整个根系系统严重肿瘤，肿瘤龟裂，地上部分停止生长或枯黄或死亡。

大白菜增产率(%)=[(处理区地上部鲜重－空白对照区地上部鲜重)/空白对照区地上部鲜重]×100。

1.2.4 大田防病试验

试验于 2016 年 5 月至 8 月在云南省微生物菌种筛选与应用发酵工程中心根肿病重病区红土试验田进行，其中 5 月 2 日至 7 月 1 日为第一季，7 月 2 日至 8 月 31 日为第二季。试验田按面积划分为 20 个小区，小区面积 18 m^2，5 种处理均匀分布在试验田内。待大白菜出苗后每个小区保苗约 100 株，处理方式如下：空白对照和化学杀菌剂处理与盆栽试验相同；FT1：同盆栽试验的 T1，每穴浇灌 100 mL XL-1 发酵液(1×10^7 cfu/mL)；FT2：同盆栽试验的 T5；FT3，同时浇灌与喷施 XF-1 发酵液(同 FT1 与 FT2)。出苗 60 d 后采收大白菜，统计植株发病率、病情指数、防治效果[11]、地上部鲜重，并计算增产率。

1.3 数据分析

运用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行单因素方差分析，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 XF-1-*gfp* 在大白菜根系及植株内的定殖能力

2.1.1 浇灌处理后 XF-1-*gfp* 的定殖能力检测

在浇灌生防菌 XF-1-*gfp* 发酵液 1 d 后，大白菜的根内即可检测到 XF-1 菌株的存在，密度达 1.7×10^3 cfu/g 根，随着取样时间的推移，根内菌落密度呈现出“先上升后下降，最后维持稳定”的趋势(图 1)。浇灌标记菌后第 5 天，大白菜根系内 XF-1 菌落密度达到顶峰(10^4 cfu/g)，此后逐渐下降并在浇灌处理 10 d 后数量稳定在 $2\times10^3\sim4\times10^3$ cfu/g 左右。在大白菜的根表土壤中，XF-1 菌株表现出相似的定殖规律，浇灌处理 45 d 后菌落定殖密度仍然稳定在 10^5 cfu/g 土壤。此外，标记菌在根表土壤的定殖数量始终高于根际土且在接种 25 d 后要高出约一个数量级，这可能与大白菜的根系分泌物的分泌速率和分布范围有关。

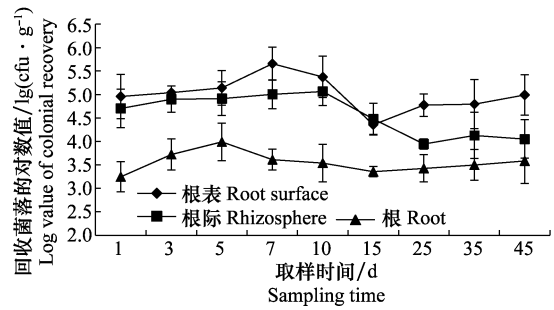


图 1 浇灌的 XF-1-*gfp* 在大白菜根内、根表和根际土壤中的定殖量

Fig. 1 Colonization of XF-1-*gfp* in root, root surface and rhizosphere by drenching

2.1.2 叶面喷施 XF-1-*gfp* 后定殖能力检测

叶面喷施 XF-1-*gfp* 悬浮液后，第 1 天取样时，大白菜叶片和茎内已有标记菌的大量侵入(10^4 cfu/g)，但尚未入侵至根内(图 2)。此后随着取样时间的推移，标记菌在大白菜根、茎、叶等组织内的密度呈现出“先上升后下降最后趋于平稳”的趋势，最后稳定在约 10^3 cfu/g，表明 XF-1 可以通过叶面喷施的方式，进入根、茎、叶，且 3 种组织内均保持基本一致的菌量。

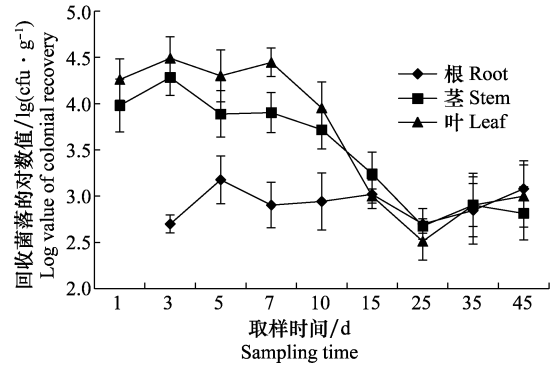


图 2 喷施的 XF-1-*gfp* 在大白菜根、茎、叶中的定殖量

Fig. 2 Colonization of XF-1-*gfp* in cabbage root, stem and leaf by spraying

2.2 XF-1 对根肿病防治效果

2.2.1 盆栽试验中 XF-1 对根肿病的防治效果

与空白对照相比，浇灌化学农药 10%氰霜唑悬浮剂和 XF-1 发酵液后，病害的发病率和病情指数均显著下降($P<0.05$)，防治效果分别达到 78.6%和 70.7%，有效地减轻了根肿病的危害。叶面喷施 XF-1 发酵液后，随着喷施次数的增加，病害的发病率和病情指数显著下降，其中连续喷施 5 次、喷施间隔为 3 d 时(T3)，根肿病的发病率、病情指数和防治

效果分别为 70.0%、40.7 和 56.4%,防控效果最为理想,连续喷施 4 次喷施间隔为 2 d(T4)时,防治效果略有下降,表明连续多次喷施更有利病害防控。

与空白对照相比,不同处理的大白菜地上部产量总体上与其防病效果呈正相关,浇灌和喷施 XF-1 菌株的增产效果显著高于化学杀菌剂 10%氰霜唑悬浮剂处理的产量,其中 T2 和 T3 增产 55.5%和 40.1%。与 T2 和 T3 的增产效果相比,10%氰霜唑悬浮剂 2 000 倍的增产效果只有 18.9%,增产效果不明显。

表 1　盆栽试验中浇灌和喷施 XF-1 对大白菜根肿病的防病增产效果1)

Table 1　Clubroot disease control and yield increase effect of XF-1 by drenching and spraying in pot experiments

处理 Treatment	发病率/% Incidence rate	病情指数 Disease index	防治效果/% Control effect	产量/g·盆$^{-1}$ Yield	增产率/% Increase ratio
空白对照 Control	(100.0±0.0)a	(93.3±1.2)a	—	(199.3±66.5)c	—
10%氰霜唑 SC cyazofamid 10% SC	(63.3±11.6)d	(20.0±2.0)f	(78.6±9.2)a	(237.0±47.1)bc	18.9
T1	(76.7±5.8)cd	(27.3±3.1)e	(70.7±6.4)b	(248.0±45.2)b	24.4
T2	(76.7±5.8)cd	(45.3±2.3)cd	(51.4±11.3)c	(310.0±58.1)a	55.5
T3	(70.0±10.0)cd	(40.7±4.2)d	(56.4±5.0)c	(279.2±44.2)ab	40.1
T4	(93.3±5.8)ab	(55.3±3.1)b	(40.7±8.7)d	(253.7±35.5)b	27.3
T5	(80.0±10.0)bc	(48.0±5.3)c	(53.6±6.9)c	(272.7±42.4)ab	36.8

1) 表中数据为平均值±标准误,数字后字母表明差异显著($P<0.05$)。下同。T1:出苗后 1、4、7、10 d 浇灌 XF-1 发酵液;T2:出苗后 1、3、5、7、9 d 喷施 XF-1 发酵液;T3:出苗后 1、4、7、10、13 d 喷施 XF-1 发酵液;T4 和 T5 处理方式分别与 T2 和 T3 类似,但处理次数减少为 4 次。The data in the table are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below. T1: Cabbage seedlings were drenched with XF-1 culture at 1 d, 4 d, 7 d, 10 d after emergence, respectively. T2: Cabbage seedlings were leaf-sprayed with XF-1 culture at 1 d, 3 d, 5 d, 7 d, 9 d after emergence, respectively. T3: Cabbage seedlings were leaf-sprayed with XF-1 culture at 1 d, 4 d, 7 d, 10 d, 13 d after emergence, respectively. T4 and T5 were similar to T2 and T3, respectively, except the seedlings were applied with XF-1 culture four times.

2.2.2　大田试验中 XF-1 对根肿病的防治效果

大田试验两季结果一致,表明本试验有较好的重复性,本文仅展示第一季数据。在田间自然环境条件下,空白对照的发病率和病情指数低于盆栽环境(表 2),分别为 82.4%和 48.9,这可能与田间土壤内休眠孢子均匀性低于盆栽有关。与空白对照相比,浇灌 XF-1 的 FT1 防效最好,达 74.0%,同时浇灌与喷施 XF-1 的 FT3 的防效达 71.1%,喷施 XF-1 的 FT2 的防效为 52.6%,浇灌 2 000 倍 10%氰霜唑悬浮剂的防效为 64.6%,化学药剂与 XF-1 处理间的防效差异不显著,它们的病情指数均显著地低于空白对照。

各处理间大白菜地上部单株鲜重差异显著(表 2)。与空白对照相比,各处理组的大白菜单株鲜重均高于空白对照,其中 FT2 的单株鲜重最高,为 175.1 g,增产 74.1%,显著高于空白对照的 100.6 g,高于化学杀菌剂的 129.6 g(增产 28.8%),保产增收效应明显。

表 2　大田试验中浇灌和喷施 XF-1 对大白菜根肿病的防病增产效果1)

Table 2　Clubroot disease control and yield increase effect of XF-1 by drenching and spraying in field experiments

处理 Treatment	发病率/% Incidence rate	病情指数 Disease index	防治效果/% Control effect	产量/g·株$^{-1}$ Yield	增产率/% Increase ratio
空白对照 Control	(82.4±14.3)a	(48.9±4.5)a	—	(100.6±28.7)b	—
10%氰霜唑 SC cyazofamid 10% SC	(38.2±17.1)b	(17.3±9.9)b	(64.6±20.4)a	(129.6±58.1)ab	28.8
FT1	(39.1±11.2)b	(12.7±5.6)b	(74.0±11.4)a	(141.7±62.6)ab	40.9
FT2	(51.1±21.5)b	(23.2±11.1)b	(52.6±22.6)a	(175.1±74.4)a	74.1
FT3	(41.7±5.5)b	(14.1±4.3)b	(71.1±8.7)a	(169.7±68.8)a	68.7

1) FT1:同盆栽试验的 T1;FT2:同盆栽试验的 T5;FT3:同时浇灌与喷施 XF-1 发酵液(同 FT1 与 FT2)。
FT1 and FT2 were the same treatments as T1 and T5 in pot experiments, respectively. FT3 was a mixed treatment with FT1 and FT2.

3　讨论

枯草芽胞杆菌 XF-1 是一株应用潜力巨大的优良生防菌株,并且被正式登记为防治根肿病的生防制剂(登记号:PD20152110)。本实验室的前期工作主要基于该菌株防治根肿病的功能基质开发、可湿性粉剂用于田间浇灌来控制根肿病[8]和防病机制研究[11,15-16]。近年来,大量具有促生效应的微生物被开发成叶面肥制剂用于农业生产[17],而植物土传病害防控基本上采用拌种和土壤处理,如撒施或浇灌土壤,采用叶面喷施的方法来防治根部病害还鲜见报道。XF-1 是一株大白菜内生枯草芽胞杆菌,本文

采用绿色荧光蛋白标记菌株 XF-1-*gfp*，证明它不仅可以通过浇灌进入到大白菜植株体内，还可以通过喷施的方式，在 24 h 内自叶表进入植株内部，沿叶-茎-根的顺序定殖入大白菜的根内，在 45 d 后，细菌数量仍能稳定在 10^3 cfu/g 组织。尽管喷施进入到植株根部的菌量比浇灌的少，但浇灌所用的剂量要比喷施大得多。故在大白菜出苗后 1 d，隔 2～3 d 连续浇灌 4 次，在盆栽试验时防效达 70.7%，在大田试验时防效达 74.0%，均与化学药剂 10%氰霜唑悬浮剂 2 000 倍液出苗后 7 d 与 14 d 两次施药防效相当；它们的防治效果均高于喷施 1×10^7 cfu/mL 的 XF-1 发酵液至大白菜叶片的处理，喷施防治在盆栽试验的防效为 40.7%～56.4%，在大田的防效达 52.6%。无论是盆栽试验，还是大田小区试验，浇灌和喷施均可以挽回大白菜的产量损失 24.44%～74.06%，高于化学药剂的 18.92%～28.83%，表明 XF-1 具有很好的促生长肥效功能。然而，大田小区试验表明，浇灌与喷施同时进行时，其防效达 71.1%，与仅浇灌处理防效(74.0%)无显著差异，未出现双重叠加防效，这可能与根肿病菌在大白菜胚根伸出后，根肿病菌很快萌发和侵入根毛，而生防菌从浇灌和喷施到进入植株根系内需要一定的时间有关。此外，即使植株组织内 XF-1 菌量达到 10^3 cfu/g 时，对于已侵入到根内的根肿病病菌控制效果不显著，即抑制根肿病菌要有足够的细菌量才起作用，或者它对根肿病菌的作用主要发生在根表或未侵入之前，但究竟多少菌量，在寄主体内或体外发生作用？还有待进一步研究。

浇灌 XF-1 比仅喷施的效果更好。喷施兼有防病和增加肥效的功能。本文不仅为根肿病的有效防控提供了一种良好方法，同时，也为具有喷灌设施的十字花科蔬菜基地防控根肿病提供了试验依据，可以节省人力和费用，还为其他作物根部难防病害提供一个范例，即减少化学农药的使用，采用有益内生菌，结合田间喷灌设施，简化施用生防制剂程序和劳动强度，亦能起到防病效果。

参考文献

[1] LÜDERS W, FRIEDT W, KOPAHNKE D, et al. Auftreten von *Plasmodiophora brassicae* als erreger der kohlhernie im winterrapsanbau in europa sowie identifizierung, charakterisierung und molekulare kartierungneuer kohlhernieresistenzgene aus genetischen ressourcen[J]. Berichteausdem Julius Kühn-Institut, 2010,157: 27.

[2] 王靖，黄云，姚佳，等. 两株根肿病生防放线菌的鉴定及其防病效果[J]. 中国农业科学，2011，44(13)：2692－2700.

[3] REN L, JIA J G, LI M, et al. Distribution of rapeseed clubroot disease in Hubei Province and evaluation of yield loss [J]. Agricultural Science & Technology-Hunan, 2012, 13(4): 775－777.

[4] 王靖，黄云，李小兰，等. 十字花科根肿病研究进展[J]. 植物保护，2011，37(6)：153－158.

[5] WALLENHAMMAR A C. Prevalence of *Plasmodiophora brassicae* in a spring oilseed rape growing area in central Sweden and factors influencing soil infestation levels [J]. Plant Pathology, 1996, 45(4): 710－719.

[6] 刘勇，黄小琴，柯绍英，等. 四川主栽油菜品种根肿病抗性研究[J]. 中国油料作物学报，2009，31(1)：90－93.

[7] 熊国如，张翠英，刘庆丰，等. 枯草芽胞杆菌 XF-1 粗蛋白抑菌活性初步研究[J]. 植物保护，2009，35(4)：92－95.

[8] 熊国如. 枯草芽孢杆菌 XF-1 防治根肿病及其生防特性研究[D]. 昆明：云南农业大学，2009.

[9] ZHOU L, ZHANG L, HE Y, et al. Isolation and characterization of bacterial isolates for biological control of clubroot on Chinese cabbage[J]. European Journal of Plant Pathology, 2014, 140(1): 159－168.

[10] MCGRANN G R D, GLADDERS P, SMITH J A, et al. Control of clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) in oilseed rape using varietal resistance and soil amendments[J]. Field Crops Research, 2016, 186: 146－156.

[11] LIU C, YANG Z, HE P, et al. Deciphering the bacterial and fungal communities in clubroot-affected cabbage rhizosphere treated with *Bacillus subtilis* XF-1 [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 256: 12－22.

[12] SHAO J, XU Z, ZHANG N, et al. Contribution of indole-3-acetic acid in the plant growth promotion by the rhizospheric strain *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(3): 321－330.

[13] 何鹏飞. B9601-Y2 菌株的基因组解析及部分功能验证[D]. 武汉：华中农业大学，2014.

[14] MCGRANNG R D, YOXALL T, PATERSON L J, et al. Control of light leaf spot and clubroot in brassica crops using defence elicitors[J]. European Journal of Plant Pathology, 2017, 148(2): 447－461.

[15] LI Xingyu, WANG Yuehu, WU Yixin, et al. ESI LC-MS and MS/MS characterization of antifungal cyclic lipopeptides produced by *Bacillus subtilis* XF-1 [J]. Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology, 2012, 22: 83－93.

[16] LI Xingyu, MAO Zichao, WANG Yuehu, et al. Diversity and active mechanism of fengycin-type cyclopeptides from *Bacillus subtilis* XF-1 against *Plasmodiophora brassicae* [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2013, 23(3): 313－321.

[17] 莫定鸣，梁土寿，黄胜，等. 微生物菌剂在葡萄生产中的效果研究[J]. 中国果菜，2017，37(11)：20－22.

(责任编辑：田 喆)