

胡佳月, 张国强, 韩小强, 等. 2株降解菌对土壤中二甲戊灵的降解效果[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(3): 585-591.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.03.015

2株降解菌对土壤中二甲戊灵的降解效果

胡佳月, 张国强, 韩小强, 杨德松

(1. 石河子大学农学院/新疆绿洲农业病虫害治理与植保资源利用自治区普通高校重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 在实验室条件下, 研究了细菌菌株 JY-2 和 JY-5 对二甲戊灵污染土壤的修复作用及其影响因素, 并采用生物法进行验证。结果表明, 二甲戊灵的降解率与接种量呈正相关, 其中, 当接种量为 10% (0.6×10^9 CFU/g) 时, 接种后 15 d 菌株 JY-2 和 JY-5 对土壤中 200 mg/kg 二甲戊灵的降解率分别达到 66.18% 和 65.66%, 低于此接种量时降解菌的降解作用较弱; 土壤温度及含水量对菌株降解作用具有显著影响, 最适土壤温度为 30 ℃, 最佳含水量为 600 g/kg, 在此条件下, 菌株 JY-2 和 JY-5 对二甲戊灵的降解率分别为 73.25% 和 67.07%; 接种降解菌 JY-2 和 JY-5 可不同程度降解土壤中二甲戊灵, 减轻二甲戊灵对玉米和棉花生长的抑制作用, 具有一定的土壤修复作用。

关键词: 二甲戊灵; 降解菌; 生物修复

中图分类号: X592

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2017)03-0585-07

Degradation effect of two bacterial strains on soil pendimethalin

HU Jia-yue, ZHANG Guo-qiang, HAN Xiao-qiang, YANG De-song

(1. College of Agronomy, Shihezi University/Key Laboratory at Universities of Xinjiang Uygur Autonomous Region for Oasis Agricultural Pest Management and Plant Protection Resource Utilization, Shihezi 832000, China)

Abstract: JY-2 and JY-5, 2 strains of degrading bacterium, were taken as the tested strains to study the influencing factors of bioremediation of soil contaminated by pendimethalin, and the degradation effect was verified by biological method. A positive correlation was shown between the degradation rate and the inoculum size. The degradation rates of the 200 mg/kg pendimethalin by JY-2 and JY-5 at 0.6×10^9 CFU/g 15 d post-inoculation were 66.18% and 65.66% respectively. The soil temperature and moisture affected the degradation obviously. Soil temperature at 30 ℃ and soil moisture of 600 g/kg generated the highest degradation rates of JY-2 and JY-5, 73.25% and 67.07%, respectively. Inoculation of JY-2 and JY-5 mitigated the growth inhibition of maize and cotton in soil contaminated by pendimethalin, indicative of a certain degree of soil remediation.

Key words: pendimethalin; degrading bacterium; bioremediation

二甲戊灵 (Pendimethalin) 是一种高效低毒的二

硝基苯胺类除草剂, 其作用机制为抑制杂草分生组织细胞分裂, 主要用于防除玉米、马铃薯、水稻、棉花、大豆、烟草、花生、向日葵等田中大多数一年生单子叶杂草和某些阔叶杂草^[1-3]。二甲戊灵是一种应用很广的除草剂^[4], 自 2003 年推广以来, 二甲戊灵以其对农作物高度安全的特点, 目前已成为新疆最主要的除草剂品种。但由于二甲戊灵具有中度持久

收稿日期: 2016-11-27

基金项目: 科技部国际合作项目 (2015DFA11660); 国家科技支撑计划项目 (2007BAC20B04)

作者简介: 胡佳月 (1993-), 女, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 研究方向为农药毒理学。 (E-mail) 924492541@qq.com

通讯作者: 杨德松, (E-mail) yds_agr@shzu.edu.cn

性,残效期长,连年大量使用已使土壤环境遭到严重破坏,造成经济损失,因此,二甲戊灵残留修复问题受到广泛关注^[5]。

生物修复技术是一项十分经济实用环保的技术^[6]。向环境中投入高效农药残留降解菌是治理农药环境污染的一种有效方法,且已有成功的报道^[7-9]。蔡志强^[10]在修复丙酯草醚污染土壤时发现,菌株 M3-1 对 5 种灭菌土壤红砂田、黄松田、黄泥田、淡淤泥田和黄石土中的丙酯草醚均具有去除作用。Wang 等^[11]研究发现向百菌清污染土壤中施加铜绿假单胞菌株后,4 d 内土壤中的 20 mg/kg 百菌清完全降解。黄星等^[12]通过人工接种降解菌 S113,有效地去除了土壤中的甲磺隆残留,并在一定程度上解除了对玉米的药害。国内外利用降解菌修复农药污染土壤的研究较多,但使用降解菌对二甲戊灵污染土壤的修复研究则较少。因此,本研究以前期分离的二甲戊灵高效降解菌为对象,分析其对二甲戊灵残留土壤的修复效果及影响因素,并采用生物法对其降解效果进行验证,旨在为二甲戊灵污染土壤的生物修复提供理论支持和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试菌株和植物 菌株 JY-2(*Serratia* sp.) 和 JY-5(*Pseudomonas* sp.), 为本实验室前期从连续施用 5 年二甲戊灵的新疆棉田土壤中分离获得, GenBank 序列号分别为 KY432775 和 KY432776。这 2 株细菌能在以二甲戊灵为唯一碳源的无机盐培养基中生长,在外加碳源浓度 0.5%、接种量 10%、初始二甲戊灵浓度 200 mg/L、pH 7.0、温度 30 ℃ 的最佳培养条件下振荡培养 3 d,二甲戊灵的降解率分别可达 83.34% 和 82.79%。供试玉米品种为新玉 9 号,棉花品种为新陆早 45 号,市场购置。

1.1.2 试剂和培养基 33%二甲戊灵乳油,天津京津农药厂产品;95%二甲戊灵标准品,山东华阳农药化工集团有限公司产品;丙酮和二氯甲烷均为分析纯;无机盐培养基: NH_4NO_3 1.0 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g, KH_2PO_4 0.5 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.5 g, K_2HPO_4 1.5 g, 蒸馏水 1 000 ml, pH 7.0~7.2; 牛肉膏蛋白胨培养基: 牛肉膏 3.0 g, 蛋白胨 10.0 g, NaCl 5.0 g, 蒸馏水 1 000 ml, pH 7.0~7.2。

1.1.3 供试土壤 试验土壤采自石河子大学试验

站(44°18'N, 86°02'E)。试验地土壤的理化性质为: 有机质 29.15 g/kg, 全氮 1.56 g/kg, 速效磷 43.50 mg/kg, 速效钾 140.58 mg/kg。取土深度 0~30 cm, 过 2 mm 筛, 160 ℃ 干热灭菌 4 h。该土壤未曾使用二甲戊灵。

1.2 试验方法

1.2.1 降解菌的制备 将供试菌株单菌落接种至牛肉膏蛋白胨液体培养基中, 然后在 30 ℃、180 r/min 摇床培养 24 h, 离心(10 000 r/min, 10 min), 倒掉上清液, 将沉淀的菌体用等量的无机盐培养基洗涤, 最后制备细胞悬浮液。稀释平板法测定菌液的细胞浓度, 菌株 JY-2 约为 5.7×10^9 CFU/ml, 菌株 JY-5 约为 6×10^9 CFU/ml。

1.2.2 土壤中二甲戊灵含量的测定 准确称取 10.0 g 土壤, 放入 50 ml 的离心管中, 加入 20 ml 乙腈, 振荡提取 30 min, 加入 4.0 g 氯化钠, 涡旋 1 min, 在 4 000 r/min 下离心 5 min, 取离心后上清液 10 ml 于置于圆底烧瓶中, 并加入无水硫酸钠去除有机相中水分, 40 ℃ 减压浓缩近干, 丙酮定容至 5 ml, 过 0.22 μm 滤膜, 高效气相色谱检测。色谱条件: HP-5 色谱柱, 30.0 m \times 320.00 μm \times 0.25 μm , 进样口温度 280 ℃, 柱温 200 ℃, 检测器室温度 300 ℃, 柱箱升温程序 250 ℃ 保持 0.5 min, 5 ℃/min 升到 280 ℃ 保持 1 min, (载气) 氮气流速 30 ml/min, 氢气流速 25 ml/min, 空气流速 300 ml/min, 进样量 1.0 μl 。上述色谱条件下, 二甲戊灵保留时间约为 2.169 min。以 5 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg 二甲戊灵 3 个浓度重复 5 次的标准添加回收率为 77.18%~92.80%, 相对标准偏差在 2.39% 至 8.73% 之间, 满足测定要求。

1.2.3 土壤中二甲戊灵降解试验 称取 100 g 供试土壤于小号花盆中, 加入二甲戊灵, 使土壤中二甲戊灵含量分别为 100 mg/kg、200 mg/kg、500 mg/kg、1 000 mg/kg, 混合均匀后, 分别加入 JY-2 和 JY-5 菌悬液并加水使土壤中的含水量为田间最大持水量的 60%, 使土壤中菌体含量约为 0.6×10^9 CFU/g。置于培养箱中 30 ℃ 暗培养, 分别于 0 d、1 d、3 d、7 d、11 d、15 d 检测土壤中二甲戊灵的残留量, 每一处理重复 3 次, 同时设空白对照。

1.2.4 土壤中二甲戊灵降解影响因素试验

1.2.4.1 接种量 称取 100 g 供试土壤于花盆中, 加入二甲戊灵, 使土壤中的二甲戊灵含量为 200

mg/kg,混合均匀。分别以5%、10%、15%、20%的接种量,将菌悬液接种至供试土壤中,使土壤中菌体含量分别为 0.3×10^9 CFU/g、 0.6×10^9 CFU/g、 0.9×10^9 CFU/g、 1.2×10^9 CFU/g。调节土壤含水量为田间最大持水量的60%,15 d后取样测定土壤中二甲戊灵含量。

1.2.4.2 温度 称取100 g供试土壤于花盆中,加入二甲戊灵,使土壤中二甲戊灵含量为200 mg/kg,混合均匀。以10%的接种量将菌悬液接种至土壤中,调节土壤含水量为田间最大持水量的60%。分别置于25℃、30℃、35℃培养箱内进行暗培养,15 d后取样测定土壤中二甲戊灵残留量。

1.2.4.3 湿度 称取100 g供试土壤于花盆中,加入二甲戊灵,使土壤中二甲戊灵含量为200 mg/kg,混合均匀。以10%的接种量将菌悬液接种至土壤中,调节土壤含水量分别为200 g/kg、400 g/kg、600 g/kg、800 g/kg。置于30℃培养箱中进行暗培养,15 d后取样测定土壤中二甲戊灵残留量。

1.2.5 生物法验证高效降解菌的降解效果 采用生物法^[13]验证高效降解菌在土壤中降解二甲戊灵的效果。设置以下处理:土壤中无二甲戊灵,无降解菌(空白对照);土壤中含200 mg/kg二甲戊灵,但不接种降解菌;土壤中含200 mg/kg二甲戊灵,并接种10%的降解菌JY-2;土壤中含200 mg/kg二甲戊灵,并接种10%的降解菌JY-5。选择适宜降解条件进行盆栽试验,待土壤处理后14 d,分别播种棉花和玉米种子,每盆15粒,测定出苗率,并于播种后21 d对其株高、根长、鲜质量、干质量和须根数进行测量,观察有无药害产生,对毒性效应进行评估。

1.3 数据分析

土壤中二甲戊灵残留量(W)计算: $W = (C \times A_1 \times V_1 \times V_2) / (A_2 \times V_3 \times m)$,式中 C 为标准溶液浓度(mg/L), A_1 为样品中被测农药的峰面积, A_2 为标准品中被测农药的峰面积, V_1 为提取溶剂总体积(ml), V_2 为吸出用于检测的提取溶剂体积(ml), V_3 为样品定容的体积(ml), m 为样品质量(g)。相对降解率(X)计算: $X = (C_{CK} - C_x) / C_{CK} \times 100\%$,式中 C_x 为接菌处理土壤中二甲戊灵含量(mg/kg), C_{CK} 为未接菌处理土壤中二甲戊灵含量(mg/kg)。生长抑制率(I)计算: $I = (N_0 - N_s) / N_0 \times 100\%$,式中 N_0 为空白对照组植株平均株高, N_s 为不同处理组植株平均株高。

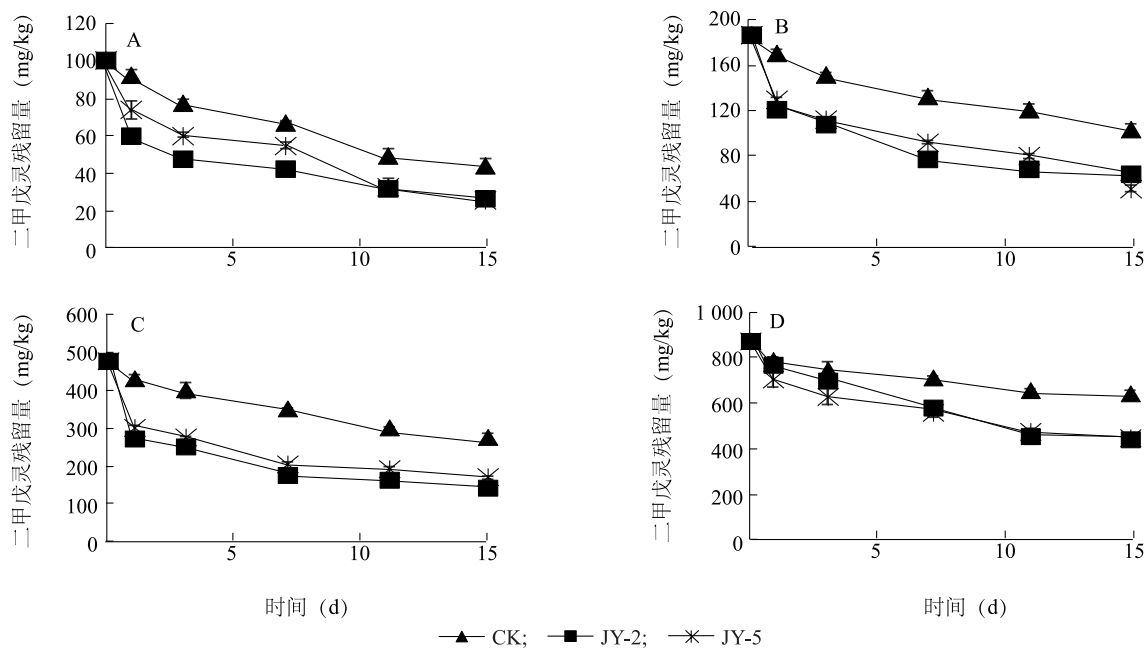
数据采用SPSS 19.0和Excel统计软件进行方差分析和多重比较,处理之间的差异显著性分析采用Duncan's新复极差法。所列结果为3次重复测定值的平均值。

2 结果与分析

2.1 菌株JY-2和JY-5对土壤中二甲戊灵的降解效果

菌株对不同含量二甲戊灵土壤的降解动态如图1所示。二甲戊灵初始含量为100 mg/kg的处理组,接种后第15 d,经过菌株JY-2和JY-5的降解,土壤中二甲戊灵含量从101.03 mg/kg分别降到26.9 mg/kg和26.11 mg/kg,降解率分别为73.37%和74.15%,菌株间差异不显著;二甲戊灵初始含量为200 mg/kg的处理组,接种后第15 d,二甲戊灵的降解率分别为72.32%和65.69%,相对于自然降解率44.44%分别提高了27.88和21.25个百分点,菌株JY-2显示了较好的降解特性,差异显著;二甲戊灵含量为500 mg/kg的处理组,前期降解较快,接种后第7 d,菌株对二甲戊灵的降解率达50%以上,后期相对缓慢,第15 d的降解率分别为70.61%和64.36%;与前3个二甲戊灵含量处理相比,菌株在二甲戊灵初始含量为1 000 mg/kg土壤中对二甲戊灵的降解相对较缓,前7 d自然降解(对照)速率为23.37 mg/(kg·d),菌株JY-2和JY-5的降解速率分别为45.35 mg/(kg·d)和42.30 mg/(kg·d),第15 d时菌株降解率仅为50%左右,显著低于前3个二甲戊灵含量处理。由此可见,土壤中高浓度的二甲戊灵会对降解菌生长产生抑制作用,导致降解能力下降。

二甲戊灵在土壤中的降解动态符合一级动力学方程, $C_t = C_0 e^{-kt}$,其中 C_0 为施药后二甲戊灵的原始累积量, k 代表降解速率常数, C_t 为残留量, t 为取样时间,其降解的动力学参数如表1所示。二甲戊灵初始含量为100 mg/kg、200 mg/kg、500 mg/kg、1 000 mg/kg处理的对照组(未接种降解菌)土壤中二甲戊灵降解半衰期分别为12.37 d、18.73 d、19.80 d和30.13 d,接种降解菌处理的降解半衰期有所缩短,接种菌株JY-2处理的土壤中二甲戊灵降解半衰期分别为9.49 d、9.76 d、10.19 d、14.14 d,接种菌株JY-5处理的土壤中二甲戊灵降解半衰期分别为8.34 d、11.17 d、11.94 d、12.38 d。



A、B、C、D: 二甲戊灵初始含量分别为 100 mg/kg、200 mg/kg、500 mg/kg、1000 mg/kg。

图 1 菌株 JY-2 和 JY-5 对土壤中二甲戊灵的降解动态

Fig.1 The degradation dynamics of pendimethalin in soil by strains JY-2 and JY-5

表 1 二甲戊灵的降解动力学方程及相关参数

Table 1 Degradation kinetic equation and parameters of pendimethalin

土壤中二甲戊灵含量 (mg/kg)	降解菌	动力学方程	速率常数 (k)	决定系数 (R^2)	半衰期 (d)
100	CK	$C_t = 97.074e^{-0.056t}$	0.056	0.979 1	12.37
	JY-2	$C_t = 73.310e^{-0.073t}$	0.073	0.842 3	9.49
	JY-5	$C_t = 87.759e^{-0.083t}$	0.083	0.950 3	8.34
200	CK	$C_t = 177.950e^{-0.037t}$	0.037	0.974 9	18.73
	JY-2	$C_t = 155.860e^{-0.071t}$	0.071	0.921 8	9.76
	JY-5	$C_t = 142.910e^{-0.062t}$	0.062	0.830 5	11.17
500	CK	$C_t = 452.440e^{-0.035t}$	0.035	0.979 5	19.80
	JY-2	$C_t = 337.070e^{-0.068t}$	0.068	0.792 6	10.19
	JY-5	$C_t = 357.420e^{-0.058t}$	0.058	0.802 7	11.94
1 000	CK	$C_t = 828.990e^{-0.023t}$	0.023	0.964 0	30.13
	JY-2	$C_t = 785.530e^{-0.049t}$	0.049	0.871 5	14.14
	JY-5	$C_t = 840.140e^{-0.056t}$	0.056	0.797 1	12.38

2.2 菌株接种量对二甲戊灵降解的影响

当接种量为 20% 时, 菌株 JY-2 和 JY-5 处理后土壤中二甲戊灵的降解率于 15 d 时分别从未接种降解菌对照的 38.80% 增加到了 69.66% 和 68.79%。且随接种量的增加降解率不断加

大。当接种量为 5% 时, 二甲戊灵的降解率分别为 55.17% 和 59.50%; 当接种量增加到 10% 时, 菌株 JY-2 和 JY-5 降解率均有较大幅度增加, 分别为 66.18% 和 65.66%, 之后增长变缓 (图 2)。

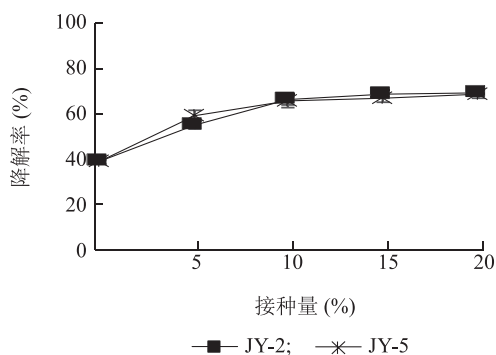


图2 接种量对菌株 JY-2 和 JY-5 降解土壤中二甲戊灵的影响

Fig.2 Effect of inoculum size on pendimethalin degradation rate in soil by strains JY-2 and JY-5

2.3 土壤温度对二甲戊灵降解的影响

环境温度分别为 25 ℃、30 ℃、35 ℃时,接种后 15 d 菌株 JY-2 处理土壤中二甲戊灵的降解率分别为 42.01%、68.28%、55.03%,菌株 JY-5 的降解率分别为 43.38%、62.64%、51.92%。温度为 30 ℃时,菌株生长最为旺盛,降解率最高,与对照组相比菌株 JY-2 和 JY-5 的降解率分别增加了 29.06%和 23.42%;温度 25 ℃则不利于降解菌株的生长,降解能力显著下降(图 3)。

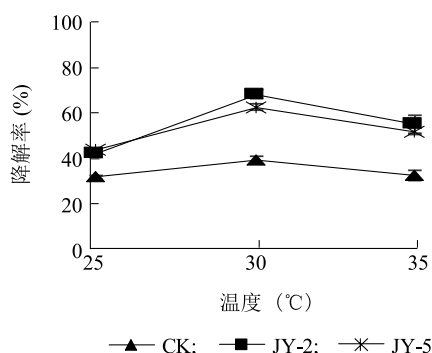


图3 温度对菌株 JY-2 和 JY-5 降解土壤中二甲戊灵的影响

Fig.3 Effect of temperature on pendimethalin degradation rate in soil by strains JY-2 and JY-5

2.4 土壤湿度对二甲戊灵降解的影响

不同土壤含水量下二甲戊灵的自然降解率均为 35%左右。加入降解菌后,二甲戊灵的降解率明显增加,且随着土壤含水量的增加,二甲戊灵的降解率出现先增后降的趋势(图 4)。土壤含水量 600 g/kg 时二甲戊灵降解率显著高于其他土壤含水量处理,菌株 JY-2 和 JY-5 的降解率分别为 73.25%和

67.07%;当土壤含水量为 800 g/kg时,土壤中二甲戊灵的降解率明显下降,降解率分别降至 56.97%和 52.88%。

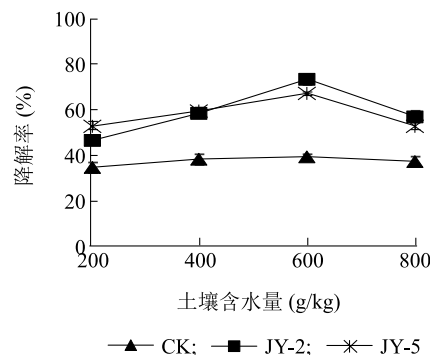


图4 土壤含水量对菌株 JY-2 和 JY-5 降解土壤中二甲戊灵的影响

Fig.4 Effect of moisture on pendimethalin degradation rate in soil by strains JY-2 and JY-5

2.5 菌株 JY-2 和 JY-5 对土壤中二甲戊灵残留降解效果的生物法验证

土壤修复试验结果表明,2 种菌剂均能有效降解土壤中的二甲戊灵。空白对照与接种菌株处理的玉米和棉花长势良好,而土壤中含 200 mg/kg二甲戊灵但不接种降解菌处理的玉米萎蔫变黄,根部肿大,棉花植株矮小,二甲戊灵药害较为严重。从表 2、表 3 中可以看出,仅加药而不加菌处理的玉米出苗率仅为 33.33%,棉花出苗率相对较高,为 71.11%;而加药加菌处理的土壤中二甲戊灵浓度降低,加菌株 JY-2 和 JY-5 处理的玉米出苗率提高到 55.56%和 67.78%,棉花出苗率增加到 88.89%和 91.11%,均与加药不加菌处理差异显著。株高、根长、鲜质量、干质量、须根数等指标的测量结果与此一致。经过 21 d 的培养,仅加药而不加菌处理的玉米和棉花药害严重,株高分别为空白对照的 18.00%和 23.93%,生长抑制率分别为 82.00%和 76.07%。经菌株 JY-2 和 JY-5 处理后,生长抑制减轻,玉米的抑制率分别为 40.67%和 39.35%,分别降低了 41.34%和 42.66%;棉花的抑制率分别为 20.85%和 10.37%,分别降低了 55.22%和 65.70%。此外,接种二甲戊灵降解菌后,玉米苗和棉花苗的鲜质量和干质量均显著高于仅加药而不加菌处理。

表 2 菌株 JY-2 和 JY-5 处理二甲戊灵残留土壤对玉米生长的影响

Table 2 The degradation of pendimethalin by strains JY-2 and JY-5 indicated by maize growth

处理	出苗率 (%)	株高 (cm)	根长 (cm)	鲜质量 (g)	干质量 (g)	须根数
CK1	91.11±2.22a	41.60±2.69a	3.08±0.50a	2.92±0.37a	0.38±0.05a	18.60±3.61a
CK2	33.33±3.85c	7.48±0.90c	2.08±0.16b	0.24±0.06b	0.04±0.01c	4.40±0.68a
JY-2	55.56±6.36b	24.68±4.08b	2.96±0.21ab	2.51±0.43a	0.28±0.03b	15.40±1.91a
JY-5	67.78±5.56b	25.23±4.22b	2.27±0.16ab	2.26±0.27a	0.23±0.03b	15.17±1.70b

CK1: 土壤中无二甲戊灵, 无降解菌 (空白对照); CK2: 土壤中含 200 mg/kg 二甲戊灵, 但不接种降解菌; JY-2: 土壤中含 200 mg/kg 二甲戊灵, 并接种 10% 的降解菌 JY-2; JY-5: 土壤中含 200 mg/kg 二甲戊灵, 并接种 10% 的降解菌 JY-5。同列不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平。

表 3 菌株 JY-2 和 JY-5 处理二甲戊灵残留土壤对棉花生长的影响

Table 3 The degradation of pendimethalin by strains JY-2 and JY-5 indicated by cotton growth

处理	出苗率 (%)	株高 (cm)	根长 (cm)	鲜质量 (g)	干质量 (g)	须根数
CK1	95.56±2.22a	16.88±1.39a	9.80±0.70a	3.02±0.14a	0.33±0.03ab	32.33±3.09a
CK2	71.11±2.22b	4.04±0.16c	8.28±0.56ab	1.03±0.09c	0.09±0.01c	8.40±1.78c
JY-2	88.89±2.22a	13.36±0.48b	8.52±0.41ab	2.24±0.09b	0.27±0.02b	18.20±3.25b
JY-5	91.11±3.30a	15.13±0.47b	7.40±0.36b	2.55±0.14b	0.35±0.02a	21.67±3.08b

各处理见表 2 注。同列不同小写字母表示差异达到 0.05 显著水平。

3 讨论

农药的降解包括光解、水解和微生物降解, 其中, 微生物降解是主要的降解模式, 在土壤中接种降解菌可以加速农药降解^[14-16]。本试验中, 向土壤中接种降解菌后二甲戊灵的降解率较对照组均有不同程度增加。土壤中二甲戊灵降解动力学方程显示, 菌株 JY-2 和 JY-5 处理后 4 个浓度的二甲戊灵半衰期较对照组分别缩短了 23.28%~53.07% 和 32.58%~58.91%。由此可见, 菌株 JY-2 和 JY-5 可显著加速土壤中二甲戊灵的降解, 具有较好的应用前景。

本研究对菌株 JY-2 和 JY-5 的降解条件进行了优化。在土壤中, 降解菌的降解效果受土壤温度、湿度以及接种量等因素的影响。金雷等^[17] 研究表明降解菌 QC-13 的接种量与土壤中咪唑乙烟酸的降解速率呈正相关, 降解速率随接种量的增加而提高, 这与本研究结果一致。有研究表明, 土壤温度、湿度不仅影响农药的表面释放, 还可影响降解菌的生长和降解酶的活性^[18-19]。因此, 适宜的温度、湿度条件是提高降解菌降解效果关键。本试验中, 菌株 JY-2 和 JY-5 降解二甲戊灵的最适土壤温度为 30 ℃, 最佳土壤含水量为 600 g/kg。当土壤含水量过高时, 二甲戊灵降解率出现下降趋势。原因

可能是由于含水量的加大导致土壤通透性下降, 不利于高效降解菌的生长, 从而影响降解效率^[20], 这也与林秀等^[21] 的研究结果相符合。

本研究还以玉米和棉花为供试植物, 对菌株 JY-2 和 JY-5 解除药害的作用进行了研究。由于玉米是单子叶植物, 比双子叶植物棉花所受药害严重。接种降解菌后, 棉苗药害解除程度较大, 玉米苗虽不能恢复至对照水平, 但与未加降解菌相比, 也有显著的缓解功效。宫宏琨等^[22] 曾对高效降解菌处理二甲戊灵后萝卜苗的生长情况进行研究, 发现经高效菌株 Qsun-3 和 Qsun-6 处理后, 萝卜苗的生长抑制率分别降低了 33.64% 和 30.39%, 这与本试验结果一致。本试验结果表明, 细菌 JY-2 和 JY-5 均有明显降解二甲戊灵的效果, 这为土壤修复制剂的研制及基因工程菌的构建提供了宝贵的菌种资源。但是, 本试验是在实验室模拟条件下进行的, 对其田间应用效果还需进一步验证。此外, 对降解菌降解二甲戊灵的酶学机理还应进一步探讨。

参考文献:

- [1] BARUA A S, SAHA J, CHAUDHURI S, et al. Degradation of pendimethalin by soil fungi [J]. Pestic Sci, 1990, 29(4): 419-425.
- [2] SWARCEWICZ M K, GREGORCZYK A. The effects of pesticide mixtures on degradation of pendimethalin in soils [J]. Environ-

- mental Monitoring and Assessment, 2012, 184(5): 3077-3084.
- [3] EENGBRETSON J, HALL G, HENGLE M, et al. Analysis of pendimethalin residues in fruit, nuts, vegetables, grass, and mint by gas chromatography [J]. J Agric Food Chem, 2001, 49: 2198-2206
- [4] XIANGYU T, BO Z, HIDETAKA K. A review of rapid transport of pesticides from sloping farmland to surface waters: Processes and mitigation strategies [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3): 351-361.
- [5] WAUCHOPE R D, BUTTLER T M, HORNSBY A G, et al. The SCS/ARS/CES pesticide properties database for environmental decision-making [J]. Reviews of Environmental Contamination & Toxicology, 1992, 123(6): 1-155.
- [6] TORMA A E. The basics of bioremediation [J]. Pollution Engineering (United States), 1994, 26:6.
- [7] 卢桂宁,陶雪琴,杨琛,等. 土壤中有机关农药的自然降解行为[J]. 土壤, 2006, 38(2): 130-135.
- [8] 李 纂,尚建超,蓝 潇,等. 毒死蜱降解菌的筛选及降解特性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 479-481.
- [9] ZHANG X H, ZHANG G S, ZHANG Z H, et al. Isolation and characterization of a dichlorvos degrading strain DDV-1 of *Ochr-hactrum* sp.[J]. Pedosphere, 2006, 16(1): 64-71.
- [10] 蔡志强. 多芳环化合物降解菌的筛选、特性及降解途径研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [11] WANG G L, LI R, LI S P, et al. A novel hydrolytic dehalogenase for the chlorinated aromatic compound chlorothalonil [J]. Bacteriol, 2010, 192(11): 2737-2745.
- [12] 黄 星,潘继杰,孙纪全,等. 降解菌 S113 对甲磺隆污染土壤生物修复作用的研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 150-154.
- [13] 韩婷婷,孙庆元,宗 娟. 一株黄曲霉菌种对土壤氯磺隆残留的降解特性[J]. 大连工业大学学报, 2010, 29(5): 333-337
- [14] MORE V S, TALLUR P N, NIVONZIMA F N, et al. Enhanced degradation of pendimethalin by immobilized cells of *Bacillus lehensis* XJU [J]. Biotech, 2015, 5(6): 1-8.
- [15] 王军华,王易芬,陈蕾蕾,等. 除草剂草甘膦微生物降解技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 8-12.
- [16] 沈 标. 甲基对硫磷降解菌 DLL-1 的生态学研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2001.
- [17] 金 雷,成明根,孙 斌,等. 芽孢杆菌 QC-13 对咪唑乙烟酸污染土壤的生物修复[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(6): 300-303.
- [18] HEES P A, JOHANSSON E, JONES D L. Dynamics of simple carbon compounds in two forest soils as revealed by soil solution concentrations and biodegradation kinetics [J]. Plant & Soil, 2008, 310(1): 11-23.
- [19] 王庆仁,刘秀梅,崔岩山,等. 土壤与水体有机污染的生物修复及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 159-163.
- [20] ZHANG C, XU J, LIU X, et al. Impact of imazethapyr on the microbi community structure in agricultural soils [J]. Chemosphere, 2010, 81(6): 800-806.
- [21] 林 秀. 多菌灵降解菌的筛选及其降解特性研究[D]. 石河子:石河子大学, 2011.
- [22] 宫宏琨,孙庆元,刘栓栓,等. 除草剂二甲戊乐灵降解真菌 Qsun-6 的分离及其特性[J]. 大连工业大学学报, 2014, 33(4): 254-257.

(责任编辑:张震林)