

薰衣草根际产铁载体细菌的促生作用

林彬¹, 赵妍妍¹, 玛依拉·吐尔地别克¹, 恩特马克·布拉提白^{1,2*}

(1. 伊犁师范大学 生物科学与技术学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学 薰衣草资源保护与利用重点实验室, 新疆 伊宁 835000)

摘要:为筛选薰衣草根际土壤具有产铁载体功能的促生菌, 采用刃天青(CAS)平板检测法从薰衣草根际土壤细菌 *Klebsiella pneumoniae* YSX-47、*Klebsiella pasteurii* YSX-36、*Pseudomonas rhizophila* YSX-12、*Pseudomonas savastanoi* YSX-23、*Serratia plymuthica* YSX-61 中筛选出具有产铁载体功能的菌株, 通过单因素实验法优化其产铁载体条件, 通过盆栽实验分析验证其对小麦幼苗的促生作用。结果表明: 菌株 YSX-47、YSX-36、YSX-12 具有较强的产铁载体能力, 其最佳产铁载体发酵条件为: 接种量 4%, pH 值为 8, 温度 28°C, 转速 180r/min, 酵母浸出粉 5g/L, 菌株 YSX-47、YSX-36 的最佳碳源为葡萄糖 10g/L, 菌株 YSX-12 的最佳碳源为蔗糖 10g/L, 在最佳条件下 3 个菌株的铁载体活性单位分别达到 76.62%、87.41% 和 83.26%, 盆栽实验表明菌株 YSX-47、YSX-36、YSX-12 使小麦幼苗株高分别增加了 10.80%、10.00% 和 19.32%, 叶长分别增加了 7.78%、6.35% 和 15.32%, 鲜重分别增加了 5.26%、2.63%、13.16%, 干重分别增加了 5.45%、5.45% 和 10.91%, 但菌株 YSX-47、YSX-36 处理的小麦幼苗根长减少了 12.48% 和 12.97%, 而经过菌株 YSX-12 处理的小麦幼苗根长增加了 25.25%。结果表明菌株 YSX-47、YSX-36、YSX-12 对小麦幼苗均具有一定的促生作用, 并且菌株 YSX-12 对小麦幼苗的促生效果较为显著, 能够为生物菌肥的开发提供基础。

关键词: 薰衣草; 铁载体; 发酵优化; 促生效果

中图分类号: S512.1; S182 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2024)03-0090-07

铁元素参与细胞中的许多代谢过程, 几乎是所有形式生物体必不可少的微量元素, 是微生物生长必需的元素, 它在氧化代谢、电子转移以及 DNA 和 RNA 合成等过程中起着催化剂的作用^[1]。另外, 铁元素还与植物光合作用中叶绿素的合成有密切关联^[2]。铁是地壳中第四大元素, 但大多数铁以氧化态或氢氧化态的形式存在于土壤之中, 其溶解度极低, 环境中丰富的铁元素不能很好地被植物所利用^[3], 严重限制了植物的生长^[4]。植物缺铁会导致一种名为萎黄病的植物疾病^[5], 其症状为植物幼叶变黄枯萎, 叶绿素和植物中有机物产量下降, 甚至会引起植物死亡。化肥和农药的滥用易引起土壤铁离子缺乏进而导致植物缺铁。因此, 植物缺铁是农业生产中急需解决的问题。

铁载体也被称为金属载体, 目前人们已经发现了大约 500 种不同类型的铁载体^[6]。铁载体是一种低分子量, 是与铁离子亲和力高的次生代谢物, 细菌、真菌等微生物在缺铁的环境下分泌铁载体, 与环境中的铁离子形成稳定的螯合物并运输到植物体内^[7]。因此, 当植物处在铁饥饿的条件下, 植物根际细菌会分泌铁载体来结合铁, 使土壤中溶解度较低的铁元素被充分利用, 植物的铁营养得到保证, 有利于植物的生长发育^[8]。铁载体除了对微生物铁营养的吸收有重要的作用, 它还是根际促生细菌(PGPR)抑制土壤病害的重要机制^[9]。另外, 微生物铁载体还能与病原菌直接竞争铁营养^[10-11], 抑制病原菌的生长发育, 进而有利于植物的生长^[12]。因此, 产铁载体细菌成为研究生物防治植物病害的新领域。

目前, 关于产铁载体细菌的研究主要集中在小麦、棉花等作物方面, 涉及薰衣草根际及周围土壤产铁载体细菌的报道较少。因此, 本研究以新疆伊犁哈萨克自治州的薰衣草作为材料, 采用 CAS 检测平板鉴定产铁载体能力较强的菌株, 优化了产铁载体菌株的发酵条件, 提高了薰衣草根际细菌产铁载体潜力, 为解决植物根际土壤缺铁问题提供参考依据, 同时也为今后生物菌肥的开发研制提供相关理论基础。

[收稿日期] 2023-12-21

[修回日期] 2024-01-08

[基金项目] 国家自然科学基金地区科学基金项目(31960270)。

[作者简介] 林彬(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事微生物学方面研究, E-mail: linbin199711@163.com.

* [通讯作者] 恩特马克·布拉提白(1961-), 男, 教授, 主要从事微生物分离、鉴定及活性成分方面研究, E-mail: 1632984092@qq.com.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

1.1.1 菌株

本实验室保存有伊犁哈萨克自治州薰衣草根际土壤细菌5株,分别为 *Klebsiella pneumoniae*YSX-47、*Klebsiella pasteurii*YSX-36、*Pseudomonas rhizophila*YSX-12、*Pseudomonas savastanoi*YSX-23、*Serratia plymuthica*YSX-61。

1.1.2 培养基及铁载体检测液

LB培养基:胰蛋白胨10g,酵母提取物5g,NaCl 10g,琼脂1.8g,蒸馏水1000mL。

CAS检测培养基参照文献[13]方法配制。

1.2 实验方法

1.2.1 薰衣草根际产铁载体菌株的检测

挑取单菌落接种到10mL LB液体培养基中,28℃,150rpm培养过夜,8000rpm离心15min,去掉上清保留菌体部分。用灭菌后的生理盐水洗菌两次,重悬菌体至终浓度为 1×10^6 CFU/mL。将3张已灭菌的滤纸片(6mm)均匀地铺在每个平板上,滴加10 μ L的菌悬液。在28℃下培养48h后,拍照记录实验结果,每个菌株重复3次。当菌株产生铁载体时,菌落周围的平板发生颜色变化,由蓝色变为橙黄色或粉色^[14]。

1.2.2 菌株生长曲线测定

将保存的菌悬液按2%的接种量接种于LB液体培养基中(100mL/250mL),每隔3h测定一次菌液浓度(OD₆₀₀),绘制菌株生长曲线。

1.2.3 铁载体分泌情况测定

挑取单菌落接种于LB液体培养基中,28℃,150r/min振荡培养1~4d,将菌悬液离心,分别取上清液与CAS检测液各3mL充分混匀,静置1h后在分光光度计630 nm波长处测定吸光值(As),用双蒸水作对照调零,以无菌的LB液体培养基与CAS检测液各3mL反应的吸光值为参比值(Ar),分别定量菌株YSX-47、YSX-36、YSX-12发酵1~5d的铁载体产量,计算铁载体活性单位(su)^[15], $su = [(Ar - As)/Ar] \times 100\%$ 。

1.2.4 菌株产铁载体能力判定

依据文献[16]可知,吸光度比值As/Ar每减少一个0.2增加一个“+”,一般产铁载体能力较高的细菌其吸光度比值As/Ar低于0.5。依据1.2.3中的吸光度及参比值分别对菌株YSX-47、YSX-36、YSX-12第3d的最大产铁能力进行划分。

1.2.5 薰衣草根际产铁载体菌株发酵条件优化

将保存的菌悬液接种到LB液体培养基中(100mL/250mL),采用单因素实验法研究不同接种量(2%、4%、6%和8%)、pH值(6、7、8和9)、温度(25℃、28℃、31℃和34℃)、转速(120r/min、150r/min、180r/min和210r/min)、氮源(氯化铵、硝酸钠和尿素)、碳源(葡萄糖、蔗糖和乳糖)对铁载体产量的影响,获得菌株产铁载体的最佳发酵条件。

1.2.6 薰衣草根际产铁载体菌株对小麦的促生实验

将保存的菌悬液接种到LB液体培养基中,以最佳发酵条件振荡培养3d后,菌株发酵液分别于10000r/min条件下离心10min,去除上清保留菌体部分,使用无菌蒸馏水稀释,将菌悬液的浓度调整至 1×10^8 CFU/mL。将营养土与蛭石进行灭菌处理,按照体积比7:3进行混合,分别浇灌菌株YSX-47、YSX-36和YSX-12菌悬液使混合土湿润,菌液用量为每盆50mL,对照组用50mL的无菌水处理土壤,每盆放置10粒已露白的小麦种子,每株菌株处理3盆,实验重复3次。盆栽实验使用长16cm、宽12cm、高12cm的圆盆,在伊犁师范大学种植大棚室温条件下培养,保证光照。为保证小麦健康生长,每天对小麦定量浇水,使得花盆土壤保持湿润状态。在培养21d后分别测量每株小麦的株高、根长、叶长,称量并记录每株小麦幼苗的鲜重,烘干24h后称量记录每株小麦幼苗的干重,分析薰衣草根际产铁载体细菌对小麦幼苗生长的影响。

1.3 数据分析

利用Microsoft EXCEL2021整理数据并作图,利用SPSS 26.0进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 薰衣草根际产铁载体菌株测定

通过CAS检测培养基对菌株进行检测,由图1可知,待测菌株在CAS检测培养基培养48h后,菌株

YSX-47、YSX-36和YSX-12生长良好,菌体周围出现明显的粉色或橙黄色晕圈,菌株YSX-61、YSX-23和对照均无明显反应,这表明菌株YSX-47、YSX-36和YSX-12具有产铁载体能力。

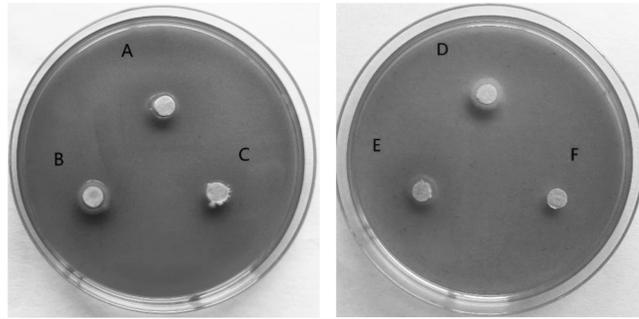


图1 薰衣草根际产铁载体细菌检测结果

注:字母A~E分别代表菌株YSX-47、YSX-61、YSX-23、YSX-12、YSX-36,字母F为无菌水。

2.2 菌株生长曲线

由图2可知,3个菌株在LB液体培养基生长时,迟滞期较短,YSX-47、YSX-36菌株的生长在0~2h为细菌生长的迟滞期,2~9h为细菌生长的对数期,9h之后细菌生长速度缓慢,生长曲线趋于平缓。YSX-12菌株生长相对较慢,在培养3h之后进入快速生长期,培养12h之后生长趋于缓慢。随着培养时间的推移,3个细菌在48h后趋于稳定。

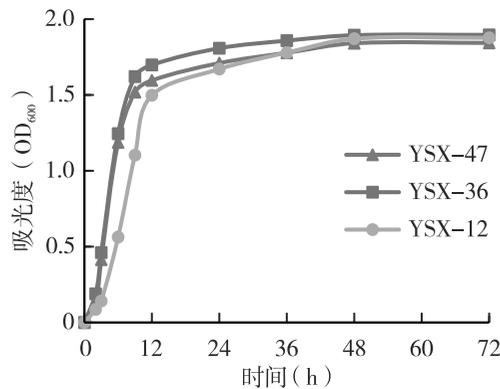


图2 不同菌株生长曲线

2.3 铁载体产量随时间的变化

不同反应时间对发酵上清液中铁载体的相对含量具有较大影响。由图3可知,菌株YSX-12铁载体量在1~3d逐渐增加,2d后铁载体产量趋于平稳,在第3d时铁载体产量达到最大,为68.86%,在第4d开始下降。菌株YSX-47、YSX-36的铁载体产量在1~3d逐渐增加,在第3d趋于平稳,达到的最大值分别为63.51%和70.4%,在第4d开始降低。

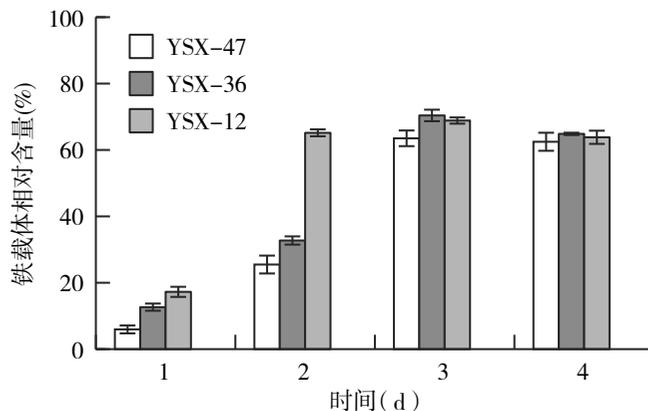


图3 不同菌株发酵1~4d铁载体变化图

2.4 菌株产铁载体能力判定

菌株 YSX-47、YSX-36 和 YSX-12 在发酵 3d 后的吸光度值 A_s/A_r 分别为 0.380、0.300、0.310, 表明 3 个菌株均具有较强的产铁载体能力, 产铁载体能力大小排序为 $YSX-36 > YSX-12 > YSX-47$, 其产铁载体能力均为“+++”(表 1)。

表 1 菌株产铁载体能力直观表

菌株编号	A_s	A_r	$(A_r - A_s)/A_r$	A_s/A_r	产铁载体能力
YSX-47	0.238	0.652	0.635	0.380	+++
YSX-36	0.193	0.652	0.704	0.300	+++
YSX-12	0.203	0.652	0.689	0.310	+++

2.5 薰衣草根际产铁载体细菌发酵条件优化

2.5.1 不同接种量对铁载体合成的影响

不同的接种量对铁载体的合成影响较小。由图 4(a)可知, 当接种量为 4% 时, 菌株 YSX-47、YSX-36、YSX-12 的铁载体产量达到最大值, 相对含量分别为 65.51%、74.67%、69.54%。当接种量大于 4% 时, 随着接种量的增加, 铁载体的产量逐步降低。因此, 最佳接种量为 4%。

2.5.2 不同 pH 值对铁载体合成的影响

pH 值对细菌的生长具有重要作用, 不同的 pH 值对铁载体的合成有着显著影响。由图 4(b)可知, 当 pH 值为 6 时, 3 个菌株的铁载体产量处于相对较低的水准, 说明酸性条件下不仅会影响细菌的生长, 而且不利于铁载体的合成。李俊峰等人发现菌株 J61321 在 pH 值为 7.5 时铁载体的产量达到最大值, 菌株生长能力及铁载体合成效果最好^[17]。本研究分离的菌株 YSX-47、YSX-36、YSX-12 在 pH 值为 8 时, 铁载体产生能力最强, 相对含量分别达到 71.12%、80.64%、73.64%。当 pH 值高于 8 时, 3 个菌株的铁载体产量开始减弱。此外, 在 pH 值为 8 时, 铁在土壤环境中的可溶性降低, 可能会诱导土壤微生物分泌产生更多的铁载体^[18]。

2.5.3 不同温度对铁载体合成的影响

温度对铁载体的合成具有较大影响。在接种量为 4%, pH 值为 8 和不同温度条件下对菌株进行发酵培养。由图 4(c)可知, 温度为 28℃ 时, 菌株 YSX-47、YSX-36、YSX-12 的铁载体产量达到最大值, 分别为 70.52%、80.32%、74.21%。随着温度上升, 铁载体的含量处于下降趋势。由此可见, 3 个菌株合成铁载体的最佳温度为 28℃。陈伟等人分离的菌株 WN-H3 在 28℃ 时合成铁载体的产量最大^[18], 这与本研究结果一致, 可能是因为相对较低的温度有利于细菌合成铁载体。

2.5.4 不同转速对铁载体合成的影响

转速对铁载体的合成具有一定的影响。在接种量为 4%, pH 值为 8, 温度为 28℃ 和不同转速条件下对菌株进行震荡培养。由图 4(d)可知, 当摇床转速达到 180r/min 时, 最有利于铁载体的合成, 菌株 YSX-47、YSX-36、YSX-12 的铁载体产量分别达到 75.51%、82.97%、77.61%。由于转速不同, 发酵液的溶氧量发生改变, 因此, 微生物代谢速率的改变可能会影响到铁载体的合成。当转速达到 210r/min 时, 3 个菌株的铁载体产量明显下降, 可能是转速过高导致微生物细胞受到损伤, 从而影响铁载体的产量。由此可见, 铁载体合成的最佳转速为 180r/min。

2.5.5 不同氮源对铁载体合成的影响

氮源参与细菌蛋白质、核酸等含氮物质的合成, 同时也是铁载体的来源, 与铁载体的合成密切相关。采用 3 种不同的氮源, 氯化铵、硝酸钠、尿素代替 LB 培养基中的酵母浸出粉, 使菌株在接种量为 4%, pH 值为 8, 温度为 28℃ 和转速为 180r/min 的条件下进行培养。由图 4(e)可知, 3 个菌株在不同氮源的培养基中铁载体产量较之前明显减少, 可能是酵母浸出粉中的氨基酸或其他生长因子促进了铁载体的合成。因此, 3 个菌株的氮源继续使用 5g/L 的酵母浸出粉。

2.5.6 不同碳源对铁载体合成的影响

碳源主要为菌体提供碳骨架和能量, 影响铁载体合成。本实验利用 3 种 10g/L 的不同碳源替代胰蛋白胍, 使菌株在最佳 pH 值、温度、接种量、氮源的条件下进行培养。由图 4(f)可知, 以葡萄糖为碳源的情况下, 菌株 YSX-47、YSX-36 的铁载体含量最大, 分别为 76.62% 和 87.41%。当用蔗糖作碳源时, 菌株 YSX-12 合成铁载体的能力最强, 相对含量达到 83.26%。

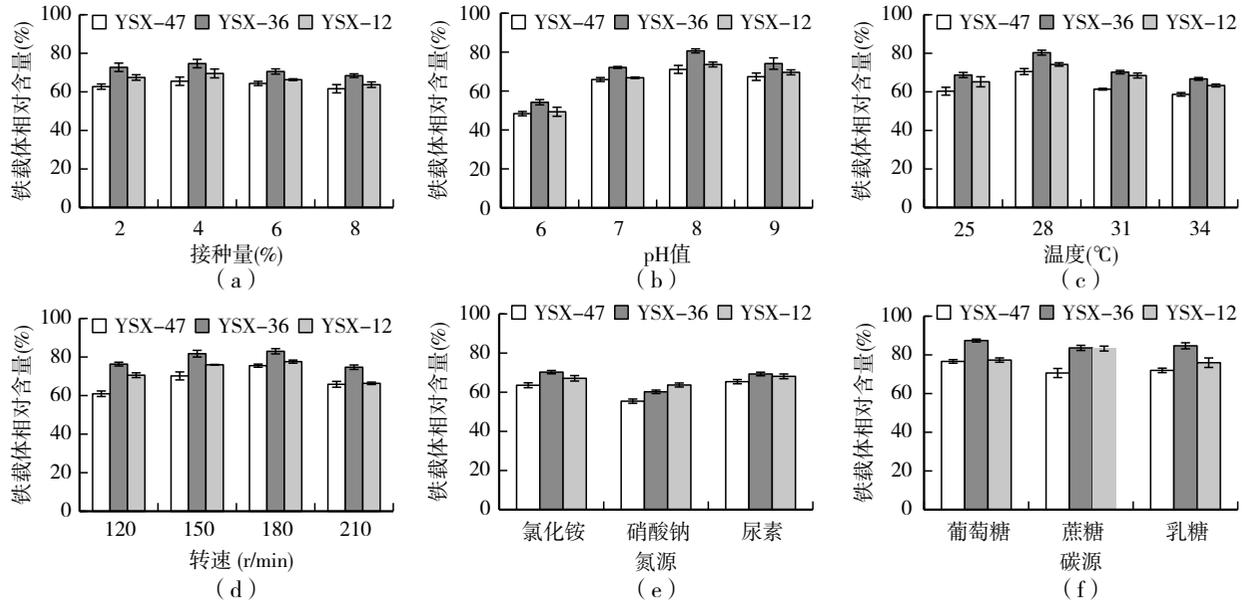


图4 不同条件对菌株铁载体合成的影响

2.6 薰衣草根际产铁载体细菌对小麦幼苗的影响

盆栽实验结果如图5所示,3个菌株对小麦幼苗具有显著的影响。由表2可知,用菌株YSX-47、YSX-36、YSX-12处理小麦后,与对照组相比,株高分别增加了10.80%、10.00%和19.32%,叶长分别增加了7.78%、6.35%和15.32%,鲜重分别增加了5.26%、2.63%、13.16%,干重分别增加了5.45%、5.45%和10.91%。但经过菌株YSX-47、YSX-36处理的小麦根长缩短了12.48%和12.97%,而经过YSX-12处理的小麦根长增加了25.25%。实验结果表明,3个菌株对小麦幼苗的株高、叶长、干重和鲜重均有一定的促生效果,但菌株YSX-47、YSX-36对小麦根系的生长会产生一定的抑制作用,菌株YSX-12对小麦的根系表现出一定的促生作用,并且菌株YSX-12对小麦的促生效果更明显。

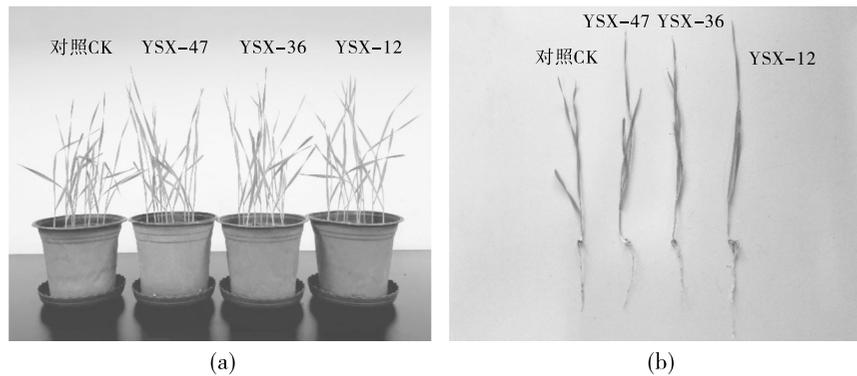


图5 不同菌株对小麦幼苗的促生作用

表2 不同菌株对小麦幼苗生长的影响

菌株	株高	叶长	根长	鲜重	干重
对照CK	22.51±1.82c	16.84±1.78b	10.10±1.91b	0.38±0.05a	0.055±0.008b
YSX-47	24.94±1.93b	18.15±1.30b	8.84±1.23b	0.40±0.06a	0.058±0.004ab
YSX-36	24.76±1.43b	17.91±0.74b	8.79±1.46b	0.39±0.02a	0.058±0.002ab
YSX-12	26.86±1.12a	19.42±1.53a	12.65±1.67a	0.43±0.06a	0.061±0.005a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

3 讨论

目前,针对薰衣草根际土壤产铁载体细菌的研究十分有限,国内外对产铁载体细菌的研究主要集中在

小麦、棉花等经济作物上。例如,王平等通过CAS检测法在小麦根圈土壤中筛选出大量产铁载体细菌^[20]。李雪艳等人从棉株体内和棉株根际土壤中筛选出4株产铁载体的芽孢杆菌^[21],其中的SHZ-24菌株产铁载体能力最强。本研究从薰衣草根际土壤细菌中测定出YSX-47、YSX-36和YSX-12菌株均有较强的铁载体产生能力,其中YSX-47、YSX-36两株属于克雷伯氏菌属,YSX-12属于假单胞菌属,丰富了薰衣草根际土壤产铁载体细菌资源,为进一步开发薰衣草相关资源提供了参考。

不同细菌产铁载体能力具有一定的差异,除了与自身特性有关,还与培养条件有一定联系。例如,曹宏丽等人从地黄土壤中分离出一株高产铁载体的恶臭假单胞菌S2,在最优发酵条件26℃,180 r/min,pH值为10下培养48h,达到了产铁载体最大含量64.37%^[22]。吴娟丽通过摇瓶发酵实验产铁载体细菌E7、W7进行优化,优化后E7、W7产铁载体相对含量分别达到90.63%和79.96%,菌株产铁载体能力显著增高^[18]。本研究采用单因素实验法分别研究了接种量、pH值、温度、转速、氮源和碳源对菌株YSX-47、YSX-36、YSX-12铁载体产量的影响,优化后的发酵条件极大地提高了菌株的产铁载体能力,菌株YSX-47、YSX-36、YSX-12的铁载体含量分别达到76.62%、87.41%和83.26%。由此可见,发酵条件对铁载体的产量具有重大的影响,进行实验时要考虑到菌株自身特性和发酵条件,才能获得菌株最大产生铁载体的能力。

因为土壤中的铁溶解度较低,铁离子往往成为限制植物生长的因素之一^[23]。由缺铁导致的作物减产不仅是全球所面临的农业问题,也是遏制我国北方地区种植业发展的关键性问题^[24]。大多数根际促生菌均具有产生铁载体的能力,其通过铁载体来吸收土壤中的铁离子,增强植物对环境条件的耐受能力,促进植物的生长^[25]。周波等人从植物根际土壤中筛选出一株高产铁载体真菌菌株RL1,通过上海青水培实验,使上海青的鲜重和叶片光合色素含量均有明显的提高,可知该菌株对上海青有良好的促生效果^[26]。本研究通过盆栽实验,确定菌株YSX-47、YSX-36、YSX-12均对小麦幼苗有一定的促生作用,具有促进植物生长的应用潜力。

4 结论

通过CAS检测法从薰衣草根际土壤细菌中测定出3个产铁载体能力较强的菌株,分别为YSX-47、YSX-36和YSX-12,通过单因素实验确定其最佳发酵条件:接种量4%,pH值为8,温度28℃,转速180r/min,酵母浸出粉5g/L,菌株YSX-47、YSX-36的最佳碳源为葡萄糖10g/L,菌株YSX-12的最佳碳源为蔗糖10g/L,铁载体含量分别提高到76.62%、87.41%和83.26%。盆栽实验表明,菌株YSX-47、YSX-36和YSX-12对小麦幼苗均有一定的促生效果,其中菌株YSX-12的促生效果较为显著。本研究为降低化肥的使用,开发生物菌肥提供理论支持和实践应用,促进绿色农业科技的发展和革新。

参考文献:

- [1] AHMED E, HOLMSTROM S J M. Siderophores in Environmental Research: Roles and Applications[J]. *Microb Biotechnol*, 2014, 7(03): 196-208.
- [2] ALBELDA-BERENGUER M, MONACHON M, JOSEPH E. Chapter Five-siderophores: From Natural Roles to Potential Applications[J]. *Advances in Applied Microbiology*, 2019, 106: 193-225.
- [3] 贾凯,郭长虹. 高等植物体内铁运输机制研究进展[J]. *基因组学与应用生物学*, 2010, 29(06): 1152-1158.
- [4] 邓凌韦,张丽艳,马军韬,等. 机理 I 植物根系铁吸收及缺铁感应信号研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2015, (09): 140-146.
- [5] 朱芝宜,李培根,李林玉,等. 铁载体细菌对植物缺铁性黄化病生物防治的研究现状[J]. *林业科技情报*, 2020, 52(03): 9-11.
- [6] 龙云川,陈轩,周少奇. 高产铁载体根际菌的筛选鉴定及硒活化特性评价[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(05): 402-408.
- [7] GÓRSKA A, SLODERBACH A, MARSZA M P. Siderophore-drug Complexes: Potential Medicinal Applications of the 'Trojan Horse' Strategy[J]. *Trends in Pharmacological Sciences*, 2014, 35(09): 442-449.
- [8] 赵锐名,成小英. 铅胁迫下产铁载体细菌对芒草幼苗的促生特性研究[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(16): 93-97.
- [9] CATARA V. *Pseudomonas* Corrugate: Plant Pathogen and/or Biological Resource?[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2007, 8(03): 233-244.
- [10] SASIREKHA B, SRIVIDYA S. Siderophore Production by *Pseudomonas Aeruginosa* Fp6, A Biocontrol Strain for *Rhizoctonia Solani* and *Colletotrichum Gloeosporioides* Causing Diseases in Chilli [J]. *Agriculture and Natural Resources*, 2016, 50(04): 250-256.
- [11] FARINA R, BENEDUZI A, AMBROSINI A, et al. Diversity of Plant Growth-promoting Rhizobacteria Communities Associated with the Stages of Canola Growth[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 55: 44-52
- [12] BARZANTI R, OZINO F, BAZZICALUPO M, et al. Isolation and Characterization of Endophytic Bacteria from the Nickel Hyper-

- accumulator Plant *Alyssum Bertolonii*[J]. *Microbial Ecology*, 2007, 53(02):306-316.
- [13] SCHWYN B, NEILANDS J B. Universal Chemical Assay for the Detection and Determination of Siderophores[J]. *Anal Biochem*, 1987, 160:47-56.
- [14] 张缙, 吾鲁木汗·那孜尔别克, 龚凤娟, 等. 具有 ACC 脱氢酶活性的纹股蓝内生细菌的分离鉴定及其抑菌促生作用[J]. *微生物学杂志*, 2015, 35(03):23-30.
- [15] MACHUCA A, MILAGRES AMF. Use of CAS-agar Plate Modified to Study the Effect of Different Variables on Siderophore Production by *Aspergillus*[J]. *Lett Appl Microbiol*, 2003, 36:177-181.
- [16] PAYNE S M. Detection, Isolation, and Characterization of Siderophores[J]. *Methods in Enzymology*, 1994, 235:329-344.
- [17] 李俊峰, 李红芳, 姚淑敏, 等. J61321(*Alteromonas aurantia*)菌株产铁载体培养条件的研究[J]. *青岛科技大学学报*, 2007, (01):20-24.
- [18] 吴娟丽. 嗜铁素产生菌的筛选鉴定及其对供试植物促生作用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.
- [19] 陈伟, 舒健虹, 陈莹, 等. 黑麦草根际铁载体产生菌 WN-H3 的分离鉴定及其产铁载体培养条件的优化[J]. *生物技术通报*, 2016, 32(10):219-226.
- [20] 王平, 董飏, 李阜棣, 等. 小麦根圈细菌铁载体的检测[J]. *微生物学通报*, 1994, (06):323-326.
- [21] 李雪艳, 张涛, 杨红梅, 等. 棉花黄萎病拮抗细菌产铁载体测定及其对抑菌活性的影响[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(05):1074-1080.
- [22] 曹宏丽, 郝尚华, 楚梦晓, 等. 1株高产铁载体菌株的筛选鉴定以及化感作用的验证[J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(04):727-735.
- [23] 孙磊, 邵红, 刘琳, 等. 可产生铁载体的春兰根内生细菌多样性[J]. *微生物学报*, 2011, 51(02):189-195.
- [24] ELLERMANN M, ARTHUR J C. Siderophore-mediated Iron Acquisition and Modulation of Host-bacterial Interactions[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2017, 105(06):68-78.
- [25] 杨妍, 龙云川, 蒋娟, 等. 西双版纳保护区植物根际细菌的筛选及其促生能力研究[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(11):2877-2885.
- [26] 周波, 代金霞. 柠条根际产铁载体促生菌的分离鉴定及其促生特性[J]. *北方园艺*, 2017, (21):122-129.

Growth Promotion of Iron-producing Carrier Bacteria in Lavender Rhizosphere

LIN Bin¹, ZHAO Yan-yan¹, MAYILA·Tuerdibieke¹, ENTEMAKE·Bulatibai^{1,2*}

(1. College of Biological Science and Technology, Yili Normal University, Yining, Xinjiang, 835000, China;

2. Key Laboratory of Lavender Resources Protection and Utilization, Yili Normal University, Yining, Xinjiang, 835000, China)

Abstract: In order to screen the growth promoting bacteria with iron carrier function in lavender rhizosphere soil, CAS plate detection method was used. Strains with the function of iron-producing carrier were screened from lavender rhizosphere soil bacteria *Klebsiella pneumoniae* YSX-47, *Klebsiella pasteurii* YSX-36, *Pseudomonas rhizophila* YSX-12, *Pseudomonas savastanoi* YSX-23 and *Serratia plymuthica* YSX-61. The conditions of iron-producing carrier were optimized by single factor experiment, and the growth promoting effect on wheat seedlings was verified by pot experiment. The results showed that the strains YSX-47, YSX-36 and YSX-12 had strong ability to produce iron carriers, and their optimum fermentation conditions are as follows: inoculation amount 4%, pH 8, temperature 28°C, rotation speed 180r/min, and yeast extract powder 5g/L. The best carbon source of strains YSX-47 and YSX-36 was glucose 10g/L. The best carbon source of strains YSX-12 was sucrose 10g/L, under the optimal conditions, the active units of ferrous carriers of the three strains reached 76.62%, 87.41% and 83.26%, respectively. Pot experiment showed that strain YSX-47, YSX-36 and YSX-12 increased seedling height by 10.80%, 10.00% and 19.32%, respectively, and leaf length by 7.78%, 6.35% and 15.32%, respectively. Fresh weight increased by 5.26%, 2.63% and 13.16%, dry weight increased by 5.45%, 5.45% and 10.91%. However, the root length of wheat seedlings treated with strain YSX-47 and YSX-36 decreased by 12.48% and 12.97%, while the root length of wheat seedlings treated with strain YSX-12 increased by 25.25%. The results showed that strains YSX-47, YSX-36 and YSX-12 all had certain growth-promoting effects on wheat seedlings, and the effect of strain YSX-12 on promoting the growth of wheat seedlings is remarkable, which can provide a basis for the development of biological bacterial fertilizer.

Keywords: Lavender; Iron carrier; Fermentation optimization; Growth-promoting effect