

红树林固氮菌和解磷菌的分离及对秋茄苗的促生效果

何雪香¹, 李玫², 廖宝文²

(1 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2 中国林业科学院 热带林业科学研究所, 广东 广州 510520)

摘要:采用选择性培养基富集培养,结合形态及生长性状等特征分析,分别从广东湛江、珠海及海南东寨港等样地的木榄 *Bruguiera gymnorhiza*、海莲 *B. sexangula*、秋茄 *Kandelia candel*、红海榄 *Rhizophora stylosa*、无瓣海桑 *Sonneratia apetala* 和海桑 *S. caseolaris* 这6种红树植物根际中分离出固氮菌和解磷菌共59株。秋茄盆栽接种试验结果表明,上述样地分离出的部分解磷菌和固氮菌对秋茄苗的高生长和生物量增长有明显促进作用,其中1株解磷菌 He4# 单菌株接种的秋茄苗高、根干质量和总生物量比对照分别增长 58.4%、132.1% 和 133.2%,该菌株比国外引进的1株解磷菌地衣芽孢杆菌 *Bacillus lichenciformis* 的促生效果更好,前者接种的秋茄根生物量和总生物量比后者高 72.7% 和 90.2%。7株固氮菌的单接种对秋茄苗表现出不同程度的促进作用,其中菌株 Ngqq-R14 的促生效果最佳,苗高、地径、茎干质量、根干质量和总生物量分别比对照增长 38.36%、16.19%、75.46%、49.97% 和 59.31%。将7株固氮菌和7株解磷菌交互配成7个菌株组合并接种到秋茄苗的根部,接种6个月后各菌株组合处理组的苗高、茎干质量、根干质量和总生物量分别比对照增长 21.1%~69.4%、70.7%~271.5%、27.1%~111.3% 和 66.9%~123.8%,表明固氮菌与解磷菌之间存在一定的协同增效作用,促进秋茄生长的最佳接菌组合是 Nlqq-Wy4 + P12。

关键词:红树林; 固氮菌; 解磷菌; 分离; 促生菌

中图分类号:S794.9; S641.2

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2012)01-0064-05

Isolation of Nitrogen-Fixing Bacteria and Phosphate-Solubilizing Bacteria from the Rhizosphere of Mangrove Plants and Their Enhancement to the Growth of *Kandelia candel* Seedlings

HE Xue-xiang¹, LI Mei², LIAO Bao-wen²

(1 Guangdong Forest Research Institute, Guangzhou 510520, China; 2 The Research Institute of Tropical Forest, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Fifty nine isolates of nitrogen-fixing bacteria and phosphate-solubilizing bacteria were isolated based on the characteristics of morphology and growth of the bacteria on the selective growth media from the rhizosphere of mangrove plants including *Bruguiera gymnorhiza*, *B. sexangula*, *Kandelia candel*, *Rhizophora stylosa*, *Sonneratia apetala* and *S. caseolaris* in Zhanjiang and Zhuhai, Guangdong Province and Dongzhai harbor, Hainan Island. Among them 7 isolates of nitrogen-fixing bacteria and 8 isolates of phosphate-solubilizing bacteria were screened as propagule inoculants of *K. candel* in a series of potted experiments to examine their capability to promote the growth of plants. The results showed that the inoculation with a single isolate of phosphate-solubilizing bacteria He4# resulted in a significant increase in plant height, root mass and total biomass at the rate of 58.4%, 132.1% and 133.2%, respectively. The enhancement of isolate He4# on the plant growth is more significant than that of an alien isolate (*Bacillus lichenciformis*). The root biomass and total biomass of *K. candel* inoculated He4# increased by 72.7% and 90.2% than those inoculated *B. lichenciformis*. All pure inoculations with 7 different isolates of nitrogen-fixing bacteria showed positive response to the plant growth, and the inoculation with isolate

收稿日期:2011-05-03

作者简介:何雪香(1964—),女,高级工程师,E-mail:lhshan92@yahoo.com.cn

基金项目:“十一五”国家林业科技支撑计划专题(2009BADB2B0401);国家林业局“948”项目(2004-4-14)

Ngqq-R14 resulted in the maximum increase in plant height, stem diameter, stem dry mass, root dry mass and total biomass at the rate of 38.36%, 16.19%, 75.46%, 51.55% and 59.31%, respectively. Dual inoculations with 7 mixtures of one isolate of nitrogen-fixing bacteria and one isolate of phosphate-solubilizing bacteria could result in synergistic effect on the growth of the seedlings of *K. candel*, and the increase of plant height, stem dry mass, root dry mass and total biomass were 21.1%–69.4%, 70.7%–271.3%, 27.1%–111.3% and 66.9%–123.8% respectively. It can be concluded that using mixed cultures of microorganisms is advantageous over pure cultures, and the inoculation of mangroves with phosphate-solubilizing bacteria and nitrogen-fixing bacteria will promote the growth of mangrove plants.

Key words: mangrove; nitrogen-fixing bacteria; phosphate-solubilizing bacteria; isolation; plant growth promoting bacteria

红树林(Mangroves)造林成活率低(大多在50%以下)一直是难以攻克的棘手问题,尤其是在沿海立地条件恶劣滩涂地段造林仍屡屡失败,成为制约中国华南沿海红树林恢复与发展的主导因子^[1].因此,如何提高红树林造林成活率是目前建设华南沿海滩涂消浪护岸林体系中亟待攻克的技术难关,而造成红树林造林成活率低的主要原因是红树林壮苗培育技术落后.用植物促生菌(Plant growth-promoting bacteria, PGPB)接种植物已被认为是一种有效提高农作物产量的方法,PGPB可通过各种代谢途径来促进植物生长,如固氮、磷酸盐增溶、产生植物激素、合成含铁细胞或对植物病原菌的生物控制^[2-3].在20世纪90年代初,国外已经开展有关红树林促生菌的研究,并报道利用植物促生菌接种能有效促进红树林幼苗和胚轴的生长^[3-10],我国在该研究领域仍属于起步阶段^[11-12].红树林生态系统的有机质虽然很丰富,但是该生态系统往往营养匮乏,尤其是氮和磷营养元素缺乏很普遍^[2, 13-15].事实上红树林是地球上生产力最大的海洋四大生态系统之一,该系统中丰富的微生物包括溶磷菌和固氮菌等根际有益细菌的活动对系统内的营养转换和循环发挥着极大作用^[14, 16-17].迄今为止,已从各种红树林的底泥、根际和根表面分离出各种固氮细菌,主要有固氮螺菌属 *Azospirillum*、固氮菌属 *Azotobacter*、根瘤菌属 *Rhizobium*、梭菌属 *Clostridium* 和克雷伯氏菌属 *Klebsiella*^[13].在墨西哥干旱红树林生态系统中,已从黑红树植物黑皮红树 *Avicennia germinans* 的根际分离出9种解磷菌,从白红树拉关木 *Laguncularia racemosa* 的根上分离出3种解磷菌,这些固氮菌、解磷菌对红树林植物以及其他植物的促生效果试验已经有所报道^[4, 9-10, 18-19].本研究对广东和海南省常见的6种红树植物的根际固氮菌和解磷菌菌株进行分离、纯化,并通过盆栽接种试验研究各菌株的促生效果,筛选

出对红树林苗木促生效果好的优良固氮菌和解磷菌菌株以及菌种组合,为培育健壮的红树林苗木及提高红树林造林成活率提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 红树林根际固氮菌和解磷菌的分离

1.1.1 采样方法 于2005—2007年,从广东湛江红树林国家级自然保护区(以下简称湛江)、广东珠海淇澳-担杆岛省级自然保护区(以下简称珠海)、海南东寨港国家级自然保护区(以下简称东寨港)等地的红树林群落内采集多种红树植物的1~2年生小苗,用干净的铲子连泥带根把小苗完整地挖出来,放在无菌塑料袋里,带回实验室.

1.1.2 固氮菌的分离方法 从野外采集红树林小苗,用自来水把茎叶洗干净,在超净工作台上分别用装在无菌大烧杯的无菌海水冲洗根部的海泥,连续洗3次,用无菌剪刀剪取根段1~2 cm,置入装有1/3容量的无菌OAB半固体培养基(5 g·L⁻¹的琼脂)^[15]的血清瓶中,放置(32±2)℃培养箱中静止培养5~7 d.选取高度混浊的菌悬液稀释涂抹在琼脂和刚果红指示剂改良OAB固体培养基(15 g·L⁻¹的琼脂和1 g·L⁻¹的刚果红)上,于(35±2)℃下培养3~5 d.挑取不同形态的单个菌落在OAB固体培养基上划线作纯化分离和培养.然后挑取经镜检的单个菌落接种到营养肉汤液体培养基中,28~30℃下150 r/min振荡培养3~5 d, -80℃冻存.

1.1.3 解磷菌的分离方法 把根段放入装有100 mL解磷菌选择性培养基(SRSM1改良液体培养基)^[4]的250 mL三角瓶,28~30℃下150 r/min振荡培养5~7 d.选取培养基变成透明的三角瓶,稀释涂抹在SRSM1培养基(16 g·L⁻¹的琼脂)平板上,于(35±2)℃下培养3~5 d,选取产生明显的溶磷圈并使培养基紫色消退的菌落,连续在平板培养基

上划线分离纯化. 挑取纯化的菌落接种到营养肉汤液体培养基中, 28~30℃下150 r/min振荡培养3~5 d, -80℃冻存.

1.2 固氮菌和解磷菌对红树林幼苗的接种试验

1.2.1 红树植物胚轴 供试体为秋茄 *Kandelia candel* 胚轴, 选择新鲜的、大小较一致的健康胚轴, 用清水冲洗干净后, 置于 φ 为0.1%的次氯酸钠溶液浸泡消毒5~10 min, 清水冲洗后晾干备用.

1.2.2 供试的固氮菌和解磷菌菌株 选择使选择性指示培养基褪色较多、生长性状较好的固氮菌和解磷菌菌株, 在相应的液体培养基中进行扩大培养, 然后依据溶磷能力、固氮酶活性的测试结果选取8株解磷菌单菌、7株固氮菌单菌, 并将解磷菌和固氮菌进行交互配对形成7个菌种组合, 再对秋茄胚轴进行盆栽接种试验, 同时, 用1株国外引进的解磷菌地衣芽孢杆菌 *Bacillus licheniformis* (菌种来源于墨西哥西北生物研究中心) 做单菌株的秋茄胚轴盆栽接种试验, 以评估各分离菌株及其菌种组合对苗木的促生效果.

1.2.3 盆栽接种方法 接种前把直径6~7 cm、高15 cm的一批塑料容器分别加入相同土壤基质至容器的2/3, 然后加入无菌海水至刚浸过土壤表面备用. 容器在装土前清洗干净并用 φ 为0.1%的次氯酸钠溶液浸泡消毒5~10 min, 而土壤基质则经高压灭菌, 其组成为: $V(\text{红壤}): V(\text{河砂}): V(\text{火烧土}) = 6: 3: 1$.

各供试菌株培养液先用盐度为5‰的人工海水(去离子水与天然海盐制成 $5\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的NaCl溶液)稀释至 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7\text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的菌悬浮液, 每单菌株处理组按每株胚轴20 mL菌悬浮液混合; 双组合菌处理则按每株胚轴20 mL固氮菌悬浮液和20 mL解磷菌悬浮液混合. 把秋茄胚轴下半部浸在菌液中, 浸泡24 h.

最后, 将经菌液浸泡的胚轴插入以上容器, 每容器1胚轴, 把菌液平分注入各个容器中, 置于阳台培养. 每处理20个重复, 另设清水浸泡20株胚轴作对照. 试验期间, 容器内土壤保持湿润状态, 水深3 cm内, 每月添加1次盐度为5‰的人工海水.

6个月后结束试验, 每株苗木测量苗高、地径, 清洗整株并70~80℃烘干至恒质量, 分别称量每株根和茎的干质量.

1.2.4 数据处理 所有数据采用Excel软件和SPSS 15.0处理软件进行分析处理.

2 结果与分析

2.1 菌株分离

2005—2007年间, 分别从秋茄、红海榄 *Rhizophora stylosa*、无瓣海桑 *Sonneratia apetala*、木榄 *Bruguiera*

gymnorhiza、海莲 *B. sexangula* 和海桑 *S. caseolaris* 6种红树植物根际分离出解磷菌和固氮菌共59株.

菌株基本上按宿主植物(如无瓣海桑WB、秋茄QQ)、菌落的颜色(红色R、黄色Y、白色或浅色W)及菌种(固氮菌N和解磷菌P)的不同进行编号. 分离出的解磷菌菌株主要有4种菌落形态, 包括较大的黄绿色菌落, 小的杏黄色菌落, 乳白色和紫褐色菌落. 而固氮菌菌株主要有5~6种菌落形态, 包括红色而较干, 硬实, 可完整挑起的菌落; 乳白而水珠状, 湿润, 不能完整挑起的菌落; 小黄色, 扁平, 湿润, 不能完整挑起的菌落; 乳白, 浓黏液状, 不能完整挑起菌落; 乳白, 干硬, 能完整挑起菌落. 在菌株分离中发现, 固氮菌(或解磷菌)的种类随红树植物种类的不同而有所差异, 其中从无瓣海桑根际分离出来的菌种比木榄等其他红树植物的多, 如2006年从湛江4种红树植物分离出的12株解磷菌中, 无瓣海桑占58.3%, 木榄、红海榄和秋茄分别占25%、8.33%和8.33%; 12株固氮菌分离株中无瓣海桑占50%, 秋茄占41.7%, 但木榄1株也未分离出.

2.2 苗木接种试验

2.2.1 分离的解磷菌株与引进菌株的促生效果比较 选用分离得到的1株解磷菌(即He4#)与国外引进的1株解磷菌 *Bacillus licheniformis* 分别接种秋茄胚轴. 结果(表1)表明, He4#和 *B. licheniformis* 对秋茄苗的生长均有一定的促进作用. He4#接种的苗高、根生物量和总生物量与对照苗相比均达显著差异($P < 0.05$), 分别比对照增长58.4%、132.1%和133.2%; 引进菌株 *B. licheniformis* 接种的秋茄苗高、根生物量和总生物量分别比对照增长56.6%、34.4%和22.6%. 可见分离得到的解磷菌比国外引进菌株的促生效果更好, 前者的根生物量和总生物量比后者分别增长72.7%和90.2%.

2.2.2 分离的固氮菌株对秋茄苗的促生效果 7株固氮菌接种秋茄6个月后的生长指标测量结果显示(表2), 7株固氮菌对苗高生长均有不同程度的促进作用, 其中菌株Ngqq-R14接种的促生效果尤为突出. 经差异显著性分析, 菌株Ngqq-R14接种的生长指标和生物量均显著高于对照($P < 0.05$), 其苗高、地径、茎干质量、根干质量和总生物量分别比对照增长38.36%、16.19%、75.46%、49.97%和59.31%. 而菌株Nlqq-W14接种的促生效果最差, 经差异显著性分析, 其各个生长指标和生物量与对照相比差异不显著.

表 1 分离的解磷菌与引进解磷菌接种对秋茄幼苗的促生效果比较¹⁾Tab. 1 The promoting efficiency of one native isolate of phosphate-solubilizing bacteria and *Bacillus licheniformis* introduced from abroad on the growth of seedlings of *Kandelia candel*

接种菌株	苗高/cm	苗高增长率/%	地径/cm	地径增长率/%	根生物量/g	根生物量增长率/%	总生物量/g	总生物量增长率/%
对照	17.11 ± 4.19b		0.43 ± 0.05a		2.18 ± 1.10b		10.12 ± 3.57b	
He4#	27.11 ± 4.19a	58.4	0.53 ± 0.02a	23.3	5.06 ± 1.25a	132.1	23.60 ± 6.23a	133.2
<i>Bacillus licheniformis</i>	26.80 ± 3.91a	56.6	0.56 ± 0.07a	30.2	2.93 ± 1.05b	34.4	12.41 ± 3.99b	22.6

1) 同列数据后,凡具有一个小写英文字母相同者表示在 0.05 水平差异不显著 (Duncan's 方法)。

表 2 固氮菌单菌株对秋茄幼苗生长的影响¹⁾Tab. 2 The promoting efficiency of inoculants of single isolate of nitrogen-fixing bacteria on the growth of seedlings of *Kandelia candel*

接种菌种	平均苗高/cm	苗高增长率/%	平均地径/cm	地径增长率/%	平均茎干质量/g	茎干质量增长率/%	平均根干质量/g	根干质量增长率/%	平均总生物量/g	总生物量增长率/%
对照	10.48 ± 2.09c		0.42 ± 0.05c		0.38 ± 0.11c		0.77 ± 0.22b		2.36 ± 0.06c	
Ngwb-Y1	12.48 ± 1.89b	19.08	0.44 ± 0.03bc	4.76	0.57 ± 0.12b	48.53	1.17 ± 0.28a	51.55	3.48 ± 0.54ab	48.74
Ngwb-Wy1	11.74 ± 2.52bc	12.02	0.44 ± 0.04bc	3.33	0.49 ± 0.15bc	28.95	1.06 ± 0.22a	36.56	3.21 ± 0.61b	37.50
Nlqq-Wy4	11.76 ± 1.42b	12.20	0.44 ± 0.04bc	2.83	0.45 ± 0.08c	17.17	0.83 ± 0.16b	7.68	2.83 ± 0.39bc	21.10
Nlqq-W14	11.04 ± 1.88c	5.34	0.44 ± 0.04bc	3.33	0.40 ± 0.08c	4.77	0.81 ± 0.15b	3.96	2.60 ± 0.40c	11.17
Ngwb-W14	12.62 ± 3.30b	20.44	0.47 ± 0.04ab	11.90	0.52 ± 0.15b	36.71	1.02 ± 0.26a	31.33	3.17 ± 0.67b	35.49
Nghh1-R14	12.16 ± 1.88b	16.03	0.48 ± 0.02a	12.86	0.52 ± 0.06b	36.94	1.06 ± 0.13a	36.24	3.23 ± 0.32b	38.08
Ngqq-R14	14.50 ± 1.30a	38.36	0.49 ± 0.01a	16.19	0.67 ± 0.06a	75.46	1.16 ± 0.15a	49.97	3.73 ± 0.24a	59.31

1) 同列数据后,凡具有一个小写英文字母相同者表示在 0.05 水平差异不显著 (Duncan's 方法)。

2.2.3 固氮菌与解磷菌组合接种对秋茄苗的促生效果 试验结果(表 3)表明,接种 6 个月后各个菌种组合接种的秋茄苗高均比对照明显增长。经差异显著性分析,均达显著水平 ($P < 0.05$),其中以固氮菌 Nlqq-W14 与解磷菌 P5 的配对组合对苗高生长的促进效果最好,比对照增长 69.4%,而其他组合比对照增长 21.1% ~ 35.1%。各个组合接种的秋茄茎干质量、根干质量和总生物量均比对照有所增长。茎干质量比对照增长 70.7% ~ 271.5%。经差异显著性分析,有 6 个组合的茎干质量与对照组相比差异显著,

其中组 1 (Ngwb-Wy1 + P6) 和组 5 (Nlqq-W14 + P5) 的增长率最高,分别为 271.5% 和 218.9%;根干质量比对照增长 27.1% ~ 111.3%,其中组 5 最高,其次为组 2 (Ngwb-Y1 + P7) 和组 3 (Ngqq-R14 + P2)。各组合接种的苗总生物量比对照显著增长 66.9% ~ 123.7%,其中以组 4 (Nlqq-Wy4 + P12) 为最高,其次为组 5 和组 2。综合比较各生长指标的表现,组 5 的促生效果最佳,而该组合中的固氮菌 Nlqq-W14 在固氮菌单接种试验中的促生效果最差(见表 2),其可能原因是 P5 与 Nlqq-W14 之间存在增效作用。

表 3 固氮菌和解磷菌组合接种对秋茄苗的促生效果¹⁾Tab. 3 The promoting efficiency of inoculants of mixing nitrogen-fixing bacteria and phosphate-solubilizing bacteria on the growth of seedlings of *Kandelia candel*

接种菌种	苗高/cm	苗高增长率/%	茎干质量/g	茎干质量增长率/%	根干质量/g	根干质量增长率/%	总生物量/g	总生物量增长率/%
对照	12.04 ± 1.56d		0.161 ± 0.06c		0.475 ± 0.21c		0.6359 ± 0.18c	
Ngwb-Wy1 + P6(组 1)	15.31 ± 4.57b	27.2	0.597 ± 0.60a	271.5	0.604 ± 0.21bc	27.1	1.201 ± 0.74ab	88.9
Ngwb-Y1 + P7(组 2)	16.27 ± 2.87b	35.1	0.397 ± 0.13b	147.5	0.934 ± 0.28ab	96.5	1.3315 ± 0.32ab	109.4
Ngqq-R14 + P2(组 3)	16.19 ± 4.13b	34.5	0.274 ± 0.15bc	70.7	0.920 ± 0.65ab	93.6	1.1944 ± 0.69ab	87.8
Nlqq-Wy4 + P12(组 4)	14.58 ± 5.16c	21.1	0.419 ± 0.23b	160.8	1.004 ± 0.36a	111.3	1.423 ± 0.45a	123.8
Nlqq-W14 + P5(组 5)	20.40 ± 5.02a	69.4	0.512 ± 0.27a	218.9	0.847 ± 0.19ab	78.3	1.3596 ± 0.38a	113.8
Nghh1-R14 + P8(组 6)	15.72 ± 3.75b	30.6	0.348 ± 0.15b	116.9	0.775 ± 0.33b	63.1	1.1237 ± 0.42b	76.7
NGWB-W14 + P1(组 7)	14.98 ± 3.82bc	24.4	0.357 ± 0.15b	122.6	0.704 ± 0.26b	48.2	1.0617 ± 0.33b	66.9

1) 同列数据后,凡具有一个小写英文字母相同者表示在 0.05 水平差异不显著 (Duncan's 方法)。

3 讨论与结论

从广东湛江、珠海及海南东寨港 3 个红树林保护区的木榄、秋茄、无瓣海桑、红海榄、海莲和海桑 6 种红树植物根际分离出固氮菌和解磷菌菌株共 59 株,表明红树植物根际的植物促生菌较为丰富. 以往的红树林植物促生菌菌株分离筛选工作仅限于从 1~3 种植物的根际采样^[4,5,11],而本研究选取了多达 6 种红树植物,其结果更具代表性. 同时研究发现,从无瓣海桑根际分离出的菌株多于其他植物种类,其可能原因是根系分泌物的不同以及根际微环境的差异. 红树林中蕴藏着丰富的微生物资源,根际固氮菌和解磷菌的开发利用将为红树林恢复及保护发挥一定的作用.

与国外引进解磷菌 *B. licheniformis* 相比,本研究从红树植物根际分离出的解磷菌 He4# 对秋茄苗的生长促进作用更明显. 在盆栽条件下,接种 He4# 6 个月后秋茄的苗高、根生物量和总生物量分别比对照增长 58.4%、132.1% 和 133.2%,而 *B. licheniformis* 的苗高、根生物量和总生物量分别比对照组增长 56.6%、34.4% 和 22.6%. 该接种试验结果与李玫等^[12]的研究相一致,但本研究中菌株 He4# 的促生效果明显好于以往分离出的红树植物根际解磷菌^[12]. 对于微生物的解磷作用,有研究者认为微生物向周围分泌质子、有机酸和其他物质的数量和种类与难溶性磷酸盐的结构和组成成分有关^[17],解磷菌的解磷机理尚需做进一步的研究.

从红树植物根际分离出的固氮菌对秋茄苗生长也有明显促进作用. 由盆栽试验结果可见,接种不同的固氮菌均可促进秋茄苗的生长,与对照相比苗高、茎粗、茎干质量、根干质量和总生物量均有较大幅度增加. 其中接种菌株 Ngqq-R14 后,秋茄苗高、地径、茎干质量、根干质量和总生物量分别比对照增长 38.36%、16.19%、75.46%、49.97% 和 59.31%. 以往研究已证实,固氮菌是一类植物促生菌,能固定空气中的气态氮并将其转化为可供作物吸收利用的氨态氮,还能分泌维生素类和生长素类物质,刺激作物生长,对改善土壤结构、增强土壤肥力、促进作物生长、提高作物品质具有重要作用^[3,20-21],这在本文的研究中也得到体现. 本研究分别就固氮菌、解磷菌单接种对秋茄苗生长的影响进行了室内盆栽试验,取得较好的促生效果. 微生物在土壤中存活及固氮、溶磷特性往往受到土壤环境等诸多因素影响,今后尚需开展植物促生菌菌株在野外条件下的定殖、生长和存活能力研究.

研究结果还表明,从红树植物根际分离出的 7

株固氮菌无论单接种或与解磷菌配对接种,均对秋茄苗的生长及生物量的增长有一定的促进作用. 分别用 7 株固氮菌株对秋茄苗进行单接种,接种 6 个月后秋茄的苗高、地径、茎干质量、根干质量和总生物量分别比对照增长 5.34%~38.36%、2.83%~16.19%、4.77%~75.46%、3.96%~51.55% 和 11.17%~59.31%;而这 7 株固氮菌和 7 株解磷菌配对的 7 个组合接种的秋茄苗高、茎干质量、根干质量和总生物量分别比对照增长 21.1%~69.4%、70.7%~271.5%、27.1%~111.3% 和 66.9%~123.8%,其中促进秋茄生长的最佳接菌组合是 Nlqq-Wy4 + P12. 试验表明,固氮菌与解磷菌混合接种比固氮菌单菌株接种的促生效果更显著,两者之间存在协同增效作用,这与国内外的相关混合接种的研究结果相似^[10,19,22-24],为植物促生菌混合接种在红树林恢复中的应用提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 郑德璋,廖宝文,郑松发,等. 红树林主要树种造林与经营技术研究[M]. 北京:科学出版社,1999:58-63.
- [2] GLICK B R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria [J]. Can J Microbiol, 1995, 41:109-117.
- [3] BASHAN Y, HOLGUIN G. Plant growth-promoting bacteria: A potential tool for arid mangrove reforestation [J]. Trees, 2002, 16:159-166.
- [4] VAZQUEZ P, VAZQUEZ P, HOLGUIN G, et al. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon [J]. Biol Fertil Soils, 2000, 30:460-468.
- [5] ZUBERER D A, SILVER W S. 2-fixation (acetylene reduction) and the microbial colonization of mangrove roots [J]. New Phytol, 1979, 82:467-471.
- [6] TOLEDO G, BASHAN Y, SOELDNER A. Cyanobacteria and black mangroves in Northwestern Mexico: Colonization and diurnal and seasonal nitrogen fixation on aerial roots [J]. Can J Microbiol, 1995, 41:999-1011.
- [7] TOLEDO G, BASHAN Y, SOELDNER A. In vitro colonization and increase in nitrogen fixation of seedling roots of black mangrove inoculated by a filamentous cyanobacteria [J]. Can J Microbiol, 1995, 41:1012-1020.
- [8] BASHAN Y, PUENTE M E, MYROLD D D, et al. In vitro transfer of fixed nitrogen from diazotrophic filamentous cyanobacteria to black mangrove seedlings [J]. FEMS Microbiol Ecol, 1998, 26:165-170.
- [9] PUENTE M E, HOLGUIN G, GLICK B R, et al. Root-surface colonization of black mangrove seedlings by *Azospirillum halopraefers* and *Azospirillum brasilense* in seawater [J]. FEMS Microbiol Ecol, 1999, 29:283-292.

(下转第 81 页)