

多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对杨树光合作用和生物量的影响

李冠喜^{1,2,3}, 吴小芹^{1,3}, 叶建仁^{1,3}

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 连云港市农业科学院, 江苏 连云港 222006; 3. 南京林业大学 江苏省入侵有害生物预防与控制重点实验室, 江苏 南京 210037)

摘要: 为研究 *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 对杨树 *Populus* 的促生机制, 采用 LI-6400XT 便携式光合仪对接菌后的杨树叶片的光合指标及荧光参数进行了测定, 同时对杨树叶片的叶绿素质量分数及杨树的苗高、地径和生物量进行了测定。结果表明: 在处理期内, 接种 WS-FJ9 菌株处理的净光合速率(P_n), 蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)均呈先上升后下降趋势, 胞间二氧化碳摩尔分数(C_i)呈先下降后上升趋势, P_n 和 T_r 在整个处理期均高于对照, C_i 在整个处理期均低于对照, G_s 在第 30 天时低于对照, 其后均高于对照。荧光参数 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 值均高于对照; 叶绿素总量及叶绿素 a/b 比值均高于对照; 杨树实生苗接菌处理 150 d 后的苗高、地径和生物量均显著高于对照。研究结果从光合作用及生物量的角度阐明了 WS-FJ9 菌株对 NL-895 杨的促生机制, 为生物菌肥的开发与利用提供了参考依据。图 4 表 1 参 21

关键词: 植物生理学; 促生机制; 光合参数; 荧光参数; 叶绿素; 生物量

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2014)04-0570-07

Increasing photosynthesis and biomass of poplars with *Burkholderia multivorans* WS-FJ9

LI Guanxi^{1,2,3}, WU Xiaoqin^{1,3}, YE Jianren^{1,3}

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Lianyungang Academy of Agricultural Sciences, Lianyungang 222006, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory for Prevention and Management of Invasive Species, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: To study the growth-promoting mechanisms of *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 on poplars, photosynthetic indexes [net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), and intercellular CO_2 concentration (C_i)] and fluorescence parameters [F_v/F_m , Φ_{PSII} , total chlorophyll (TChl), and Chla/Chlb] of NL-895 poplar (*Populus × euramericana* NL-895) leaves inoculated with a strain of WS-FJ9 were determined by a portable photosynthetic apparatus (LI-6400XT). Simultaneously, chlorophyll content of poplar leaves, seedling height, ground diameter, and biomass were measured. Results showed that during the treatment period (150 days), P_n , T_r and G_s all increased earlier and decreased later with P_n and T_r higher, and C_i lower than control groups ($P < 0.05$). At the 30th day, G_s was lower and after the 60th day higher than the control groups ($P < 0.05$); whereas C_i was reversed. The fluorescence parameters F_v/F_m , Φ_{PSII} , TChl, and Chla/Chlb were higher than the control groups ($P < 0.05$). At the 150th day, seedling height, ground diameter, and biomass

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-11-30

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201004061); 江苏省重大科技支撑与自主创新专项项目(BE2008393); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11-0552); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 李冠喜, 副研究员, 博士, 从事微生物学研究。E-mail: guanxili@163.com。通信作者: 吴小芹, 教授, 博士生导师, 从事微生物学研究。E-mail: xqwu@njfu.edu.cn

were also greater than the control groups ($P < 0.05$). This study illustrated the growth-promoting mechanisms of strain WS-FJ9 on NL-895 poplar from the perspective of photosynthesis and biomass, provided a reference basis for development and utilization of bio-bacterial manure, and could be of great importance in popularizing sustainable agriculture. [Ch, 4 fig. 1 tab. 21 ref.]

Key words: plant physiology; growth-promoting mechanisms; photosynthetic parameters; fluorescence parameters; chlorophyll; biomass

植物根际促生细菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)是指自由生活在土壤或附生于植物根系的一类可促进植物生长及其对矿质营养的吸收和利用并能抑制有害微生物的有益细菌。自 1978 年 Burr 等^[1]首次报道了马铃薯 *Solanum tuberosum* 上存在植物根际促生细菌之后, 大量研究证实植物根际促生细菌广泛存在于多种植物的根围。植物根际促生细菌可通过固氮^[2]、解磷^[3]、分泌酶^[4]、产生激素^[5]等途径帮助植物对矿质营养的吸收和利用^[6], 增强植物的光合作用并促进植物生长。光合作用是植物最基本的生理活动之一, 是形成植物生产力的根本源泉, 光合速率是植物生理性状的一个重要指标, 也是估测光合生产能力的主要依据^[7-8]。杨树 *Populus* 为落叶树种, 是世界上栽培史最长, 用途最广的树种之一。然而, 随着杨树人工林的连作与过频的轮伐, 中国杨树人工林发生了严重的地力衰退现象, 影响了杨树健康生长。目前, 探寻新的生物质肥料, 以替代或部分替代化肥营造杨树速生丰产林的研究倍受关注。多噬伯克霍尔德氏菌 *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 菌株为江苏省入侵有害生物预防与控制重点实验室(本实验室)在前期研究中从松树 *Pinus* 根际筛选获得的 1 株根际促生细菌。前期的研究表明: 该菌具有高效解磷能力, 对哺乳动物和植物安全可靠, 能够在杨树根际定殖, 具有促进植物生长、生物防治和生物降解等多种功能^[9-11]。为从光合作用的途径阐述该菌对杨树促生的机制, 本研究探讨了接种 WS-FJ9 菌株对 NL-895 杨光合参数、叶片的叶绿素含量及苗高、地径和生物量的影响, 旨在阐明 WS-FJ9 菌株对 NL-895 杨的促生机制, 为生物菌肥的开发与利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试菌株及菌悬液的制备

多噬伯克霍尔德氏菌 *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 由本实验室采集于松树根际土壤, 保藏于中国典型培养物保藏中心 CCTCC(No. CCTCC M2011435)^[12]。参照的促生菌株 *Pseudomonas fluorescens* JW-JS1 由本实验室采集于杨树根际土壤, 保藏于中国典型培养物保藏中心 CCTCC(No. CCTCC M209027)^[13]。将上述待测试菌株活化后, 用接种环挑取少量菌体接种于装有 50 mL 营养肉汤(nutrient broth, NB)培养基的 100 mL 三角瓶中, 28 ℃, 200 r·min⁻¹ 振荡培养 48 h。发酵液(4 ℃, 4 629 × g)离心 5 min, 无菌生理盐水润洗菌体 3 次后, 无菌生理盐水调节成浓度为 1 × 10⁸ 个·mL⁻¹ 的菌悬液, 备用。

1.2 供试植物材料

供试植株为 NL-895 杨 *Populus × euramericana* NL-895。将 NL-895 杨的种子置于 1.0 g·L⁻¹ 的高锰酸钾中浸泡 2 h, 无菌水漂洗 3 次, 播种在灭菌河沙内进行育苗, 待出苗 40 d 后, 选择长势一致的杨树幼苗移栽到花盆中, 盆中培养基质为山土和草炭混合(体积比为 2:1), 高压蒸汽灭菌, 1.5 kg·盆⁻¹, 基质中速效氮为 30.0 mg·kg⁻¹, 速效磷 6.0 mg·kg⁻¹, 速效钾 23.5 mg·kg⁻¹。移栽后的盆栽幼苗置温室内统一管理。杨树苗接种 WS-FJ9 菌株后第 30, 60, 90, 120 和 150 d 后测定光合指标, 接种 WS-FJ9 菌株 150 d 后分别测定苗高、地径及杨树生物量。以接种 JW-JS1 菌株和灭菌水为双重对照。

1.3 杨树光合指标的测定

1.3.1 杨树光合参数的测定 在接种解磷细菌 WS-FJ9 处理后 30, 60, 90, 120 和 150 d 的典型晴天上午 9:00-11:30 进行测量, 选取各处理 NL-895 杨上部第 4-5 个叶片, 设 3 次重复。采用 LI-6400XT 便携式光合仪(Li-COR, 美国)的红蓝光源叶室测定叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 气孔导度(G_s , $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 胞间二氧化碳摩尔分数(C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)和蒸腾速率(T_r , $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 设定光强 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3.2 杨树叶片叶绿素质量分数的测定 采用丙酮提取法测定叶绿素质量分数^[14-15]。在接种解磷细菌

WS-FJ9 处理后 30, 60, 90, 120 和 150 d, 采集无病虫害、无机械损伤的叶片, 洗净擦干后, 剪成 1~2 mm 细丝, 混匀。称取 0.2 g 鲜叶置入试管中, 加入 20 mL 丙酮与无水乙醇等体积混合液, 保鲜膜封口后置黑暗处过夜。待试管中细丝完全变白, 采用 HWλIOS γ 型紫外吸收分光光度计测定 646 nm 和 663 nm 处的光密度值 $D(646)$ 和 $D(663)$, 设 3 次重复。代入下式即可求出叶绿素质量分数。

$$C_a=12.21\times D(663)-2.81\times D(646);$$

$$C_b=20.13\times D(646)-5.03\times D(663);$$

$$C_t=C_a+C_b;$$

$$\text{叶绿素总量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})=(C_t\times V)/(w\times 1000)。$$

其中: C_a 和 C_b 分别为叶绿素 a 和 b 的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); C_t 为叶绿素提取液的总质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); V 为样品提取液总体积(mL); w 为样品鲜质量(mg)。

1.3.3 杨树叶片叶绿素荧光参数的测定 在接种解磷细菌 WS-FJ9 处理后 30, 60, 90, 120 和 150 d, 选取各处理 NL-895 杨上部第 4~5 个叶片测量, 设 3 次重复。采用 LI-6400XT 便携式光合仪测定叶片叶绿素荧光参数。主要测定指标: 暗适应后的最小荧光(F_0), 最大荧光(F_m), 可变荧光 $F_v(F_v=F_m-F_0)$, PS II 原初光能转换效率(F_v/F_m); 光适应后的稳态荧光(F_s), 最大荧光(F_m'), PS II 实际的光化学反应量子效率 $\Phi_{\text{PSII}}(\Phi_{\text{PSII}}=(F_m'-F_s)/F_m')$ 。

1.4 杨树苗高、地径及生物量的测定

杨树实生苗接种后 150 d 后测定苗高、地径及植株生物量。植株生物量的测定方法为: 将植株取出清洗干净, 105 °C 杀青 30 min 后在 80 °C 下烘干至恒量后进行称量, 4 株·处理⁻¹, 5 次重复。

1.5 数据分析与处理

采用 Origin 8.6 软件进行数据差异显著性检验及图表绘制。

2 结果与分析

2.1 接种 WS-FJ9 菌株对杨树叶片光合参数的影响

净光合速率(P_n)是反映作物光合效率的重要指标之一。由图 1A 可知: 在温室条件净光合速率(P_n)总体呈现先升后降趋势。和对照相比, 接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均能显著提高 NL-895 杨叶片净光合速率。5 个测定期中接种 WS-FJ9 比对照分别增加了 39.0%, 46.6%, 53.0%, 68.9% 和 68.4%, 接种 JW-JS1 比对照分别增加了 13.6%, 22.4%, 31.8%, 37.7% 和 43.9%。经差异显著性检验, 各时期各处理差异均达显著水平($P<0.05$)。结果表明, 接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均能显著提高 NL-895 杨的净光合速率(P_n), 接种 WS-FJ9 处理优于接种 JW-JS1 处理。

由图 1B 可知: 在处理期内, NL-895 杨的气孔导度(G_s)呈先升后降趋势。和对照相比, 接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理在 30 d 和 60 d 时气孔导度(G_s)差异均不显著, 其后各处理差异均达显著水平。在处理 90, 120 和 150 d 时接种 WS-FJ9 处理比对照分别增加了 28.0%, 46.2% 和 20.7%, 接种 JW-JS1 处理比对照分别增加了 16.0%, 34.6% 和 13.8%。

由图 1C 可知: 在处理期内, NL-895 杨的胞间二氧化碳摩尔分数(C_i)呈先降后升再降趋势。接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均低于对照, 在处理 30 d 和 120 d 时各处理间差异达显著水平, 其余处理期各处理间差异不显著。在处理 30 d 和 120 d 时接种 WS-FJ9 处理比对照分别增加了 9.0% 和 6.7%, 接种 JW-JS1 处理比对照分别增加了 6.0% 和 3.4%。

蒸腾速率(T_r)是反映蒸腾作用强弱的一个重要指标, 也是表征植物水分代谢的状况及水分利用效率的物理量。由图 1D 可知: 在处理期内, NL-895 杨的蒸腾速率(T_r)呈先升后降趋势。接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均高于对照, 5 个测定期中接种 WS-FJ9 处理比对照分别增加了 22.6%, 7.7%, 17.4%, 18.0% 和 10.4%, 接种 JW-JS1 处理比对照分别增加了 16.1%, 5.1%, 10.9%, 12.0% 和 4.2%。

2.2 接种 WS-FJ9 菌株对杨树叶片荧光参数的影响

在荧光动力学参数中, F_v/F_m 代表 PS II 光化学的最大效率或 PS II 原初光能转化效率, 它反映了植物的潜在最大光合能力。 $\Phi_{\text{PSII}}[\Phi_{\text{PSII}}=(F_m'-F_s)/F_m']$ 表示作用光存在时 PS II 实际的光化学量子效率。它反映在光照下 PS II 反应中心部分关闭的情况下的实际光化学效率, 常用来反映电子在 PS I 和 PS II 的传递情

况，是荧光参数的重要组成部分。由图 2 可看出，在处理期内，接种 WS-FJ9 菌株处理的 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 值均高于接种 JW-JS1 处理和对照，表明接种 WS-FJ9 菌株能增强 NL-895 杨叶片的 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 值效应。

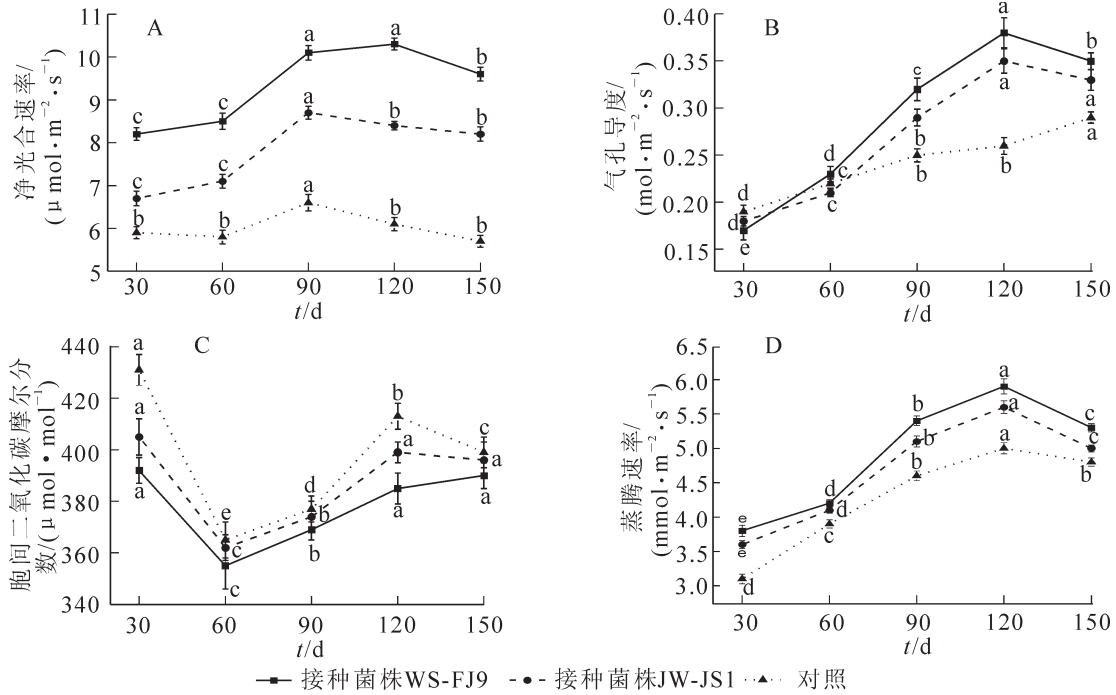


图 1 接种 WS-FJ9 菌株对 NL-895 杨光合参数的影响

Figure 1 Effect of inoculating strain WS-FJ9 on the photosynthetic parameter of NL-895 poplar seedlings

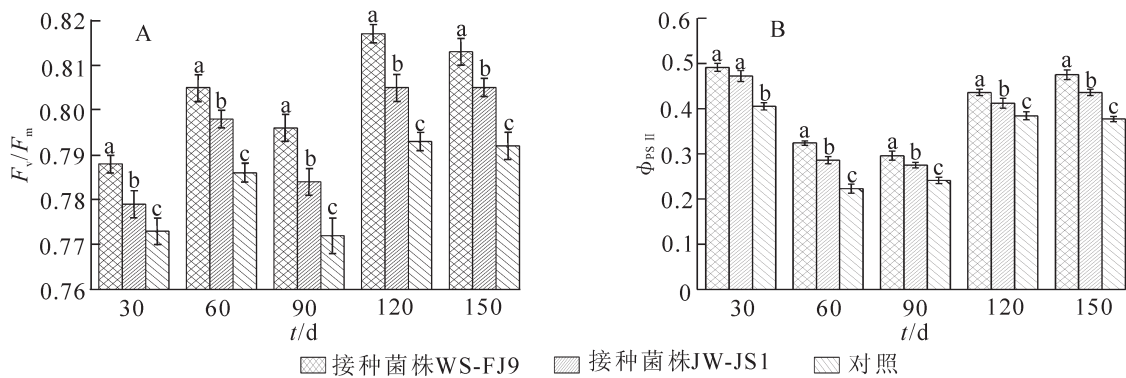


图 2 接种 WS-FJ9 菌株对 NL-895 杨叶片荧光参数的影响

Figure 2 Effect of inoculating strain WS-FJ9 on the fluorescence parameter of NL-895 poplar leaves

2.3 接种 WS-FJ9 菌株对杨树叶片叶绿素的影响

叶绿素是重要的光合作用物质，叶绿素质量分数在一定程度上反映植物光合作用的高低。由图 3A 可知：在处理期内，接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均高于对照，5 个测定期中接种 WS-FJ9 处理比对照分别增加了 21.4%，22.2%，20.7%，30.8% 和 36.0%，接种 JW-JS1 处理比对照分别增加了 14.3%，7.4%，13.7%，23.1% 和 20.0%。表明接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均能显著提高 NL-895 杨的叶绿素总量，接种 WS-FJ9 处理优于接种 JW-JS1 处理。

植物叶绿素 a/b 比值在一定程度上反映了植物对光能利用能力的强弱。由图 3B 可知：在处理期内，接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均高于对照。经差异显著性分析，5 个测定期中接种 WS-FJ9 处理叶绿素 a/b 比值均比其他 2 种处理显著增高，而接种 JW-JS1 处理和对照相比在 30 d 和 60 d 时差异不显著。表明接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理均能增强 NL-895 杨对光能利用能力，但 WS-FJ9 的促生效果优于 JW-JS1。

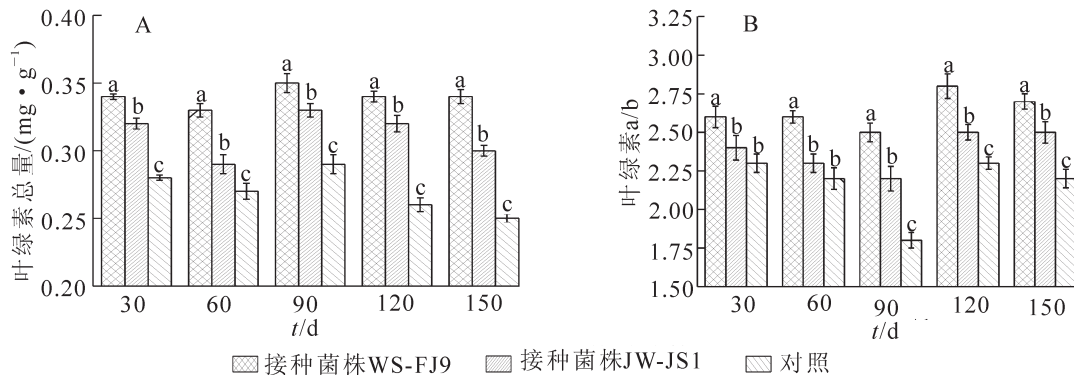


图3 接种 WS-FJ9 菌株对 NL-895 杨叶片叶绿素的影响

Figure 3 Effect of inoculating strain WS-FJ9 on the chlorophyll of NL-895 poplar leaves

2.4 WS-FJ9 菌株对杨树苗高、地径及生物量的影响

在温室条件下, 杨树实生苗接种处理 150 d 后结果如表 1 和图 4 所示。接种 WS-FJ9 和 JW-JS1 处理的植株苗高、地径和生物量均显著地超过了不接种处理, 接种 WS-FJ9 处理的苗高和生物量显著高于接种 JW-JS1 处理 ($P < 0.05$)。以上说明 2 株解磷细菌 WS-FJ9 和 JW-JS1 对杨树苗期均具有明显的促生长作用, 施用 WS-FJ9 的效果优于 JW-JS1。

表 1 WS-FJ9 菌株对 NL-895 杨实生苗生长的影响

Table 1 Effect of strain WS-FJ9 on seedling growth of NL-895 poplar seedlings

菌株	苗高/cm	苗高增长率/%	地径/mm	地径增长率/%	植株生物量/g	生物量增长率/%
WS-FJ9	92.6±8.02 a	34.59	6.74±0.40 a	26.88	14.77±0.27 a	27.27
JW-JS1	81.2±6.69 b	18.02	6.45±0.42 a	21.35	13.94±0.23 b	20.14
对照	68.8±3.70 c		5.31±0.47 b		11.60±0.40 c	

说明: 不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平。

3 结论与讨论

光合作用是植物重要的物质积累与生产的代谢活动。近年来的研究表明接种解磷菌剂能增强植物的光合作用。余旋等^[16]和吕德国等^[17]研究发现: 蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus* 能显著提高美国山核桃 *Carya illinoensis* 苗和本溪山樱 *Cerasus sachalinensis* 苗的净光合速率 (P_n)。唐菁^[18]研究表明: 土壤杆菌 *Agrobacter* sp., 微球菌 *Micrococcus* sp., 沙雷氏菌 *Serratia* sp. 显著增强了 I-69 杨幼苗的光合作用。刘辉等^[13]研究表明: 接种荧光假单胞菌 *Pseudomonas fluorescens* JW-JS1 及红绒盖牛肝菌 *Xerocomus chrysenteron* 显著增强 NL-895 杨的光合作用。陈丹^[19]研究表明, 将解磷细菌蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus* JYZ-SD1 与外生菌根真菌红绒盖牛肝菌 *Xerocomus chrysenteron* 混合接种于杨树后能明显增强杨树叶片光合作用的各项指标。常河等^[20]研究表明: 土著丛枝菌根 (AM) 真菌对荔枝 *Litchi chinensis* 实生苗生长的影响与其对光合作用的影响密切相关。可见, 生物菌肥可通过增强植物的光合作用促进植物的生长。本研究通过测定接种高效解磷细菌 *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 对 NL-895 杨叶片净光合速率 (P_n), 蒸腾速率 (T_r), 气孔导度 (G_s) 等光合参数, 从光合作用的角度阐明 WS-FJ9 菌株对杨树的促生机制。结果表明: 接种 WS-FJ9 处理能显著增加 NL-895 杨叶片的净光合速率 (P_n), 蒸腾速率 (T_r), 气孔导度 (G_s) 等光合参数, 增强了 NL-895 杨的光合作用, 从而促进了杨树的生长。



WS-FJ9 JW-JS1 对照

图 4 接种 150 d 后 NL-895 杨实生苗生长状况

Figure 4 Growth of NL-895 poplar seedling after inoculation of 150 days

叶绿体色素含量是反映植物光合能力的一个重要指标。叶绿素的合成与分解之间存在着动态平衡, 它直接影响植物的光合作用及有机物质的积累, 进而影响植物的生长速度^[21]。在荧光动力学参数中, F_v/F_m 代表 PS II 光化学的最大效率或 PS II 原初光能转化效率, 它反映了植物的潜在最大光合能力; Φ_{PSII} [$\Phi_{PSII}=(F_m'-F_t)/F_m'$] 表示作用光存在时 PS II 实际的光化学量子效率, 它反映在光照下 PS II 反应中心部分关闭的情况下的实际光化学效率, 常用来反映电子在 PS I 和 PS II 的传递情况, 是荧光参数的重要组成部分。本研究结果表明, *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 能显著增加 NL-895 杨叶片的叶绿素总量及叶绿素 a/b 比值, 增加 NL-895 杨叶片的 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 值等荧光参数。

植物根际促生细菌对宿主植物的影响是多方面的, 本研究从光合作用及生物量的途径阐述了 *B. multivorans* WS-FJ9 对杨树促生的机制并得出如下结论: 通过增加 NL-895 杨叶片的叶绿素总量及叶绿素 a/b 比值增强其荧光效应, 进而增强了 NL-895 杨的光合作用, 从而促进了杨树的生长。*B. multivorans* WS-FJ9 和 *Pseudomonas fluorescens* JW-JS1 均对杨树具有较好的促生效果, 均可作为研制杨树专用解磷菌肥的资源菌株。但从测定的各指标看, WS-FJ9 的促生效果要优于 JW-JS1。因此, 多噬伯克霍尔德氏菌 *B. multivorans* WS-FJ9 可以作为研发杨树生物菌肥的极有潜力的资源菌株。至于该菌对杨树养分代谢及土壤微环境等的影响, 有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] BURR T J, SCHROTH M N, SUSLOW T. Increased potato yields by treatment of seedpieces with specific strains of *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida* [Bacterization][J]. *Phytopathology*, 1978, **68**: 1377 - 1383.
- [2] MISHRA P K, MISHRA S, SELVAKUMAR G, et al. Enhanced soybean (*Glycine max* L.) plant growth and nodulation by *Bradyrhizobium japonicum*-SB1 in presence of *Bacillus thuringiensis*-KR1 [J]. *Acta Agric Scand Sect B Soil Plant Sci*, 2009, **59**(2): 189 - 196.
- [3] ADESEMOYE A O, TORBERT H A, KLOEPPER J W. Enhanced plant nutrient use efficiency with PGPR and AMF in an integrated nutrient management system[J]. *Can J Microbiol*, 2008, **54**(10): 876 - 886.
- [4] KIM K Y, JORDAN D, McDONALD G A. Effect of phosphate-solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizae on tomato growth and soil microbial activity [J]. *Biol Fert Soils*, 1997, **26**(2): 79 - 87.
- [5] ASGHAR H N, ZAHIR Z A, ARSHAD M. Screening rhizobacteria for improving the growth, yield, and oil content of canola (*Brassica napus* L.)[J]. *Crop Pasture Sci*, 2004, **55**(2): 187 - 194.
- [6] VESSEY J K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers [J]. *Plant Soil*, 2003, **255**(2): 571 - 586.
- [7] 上官周平, 陈培元. 水分胁迫对小麦光合作用的影响及其抗旱性的关系[J]. 西北植物学报, 1990, **10**(1): 1 - 7. SHANGGUAN Zhouping, CHEN Peiyuan. Effects of water stress on photosynthesis of wheat leaves and their relation to drought resistance [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 1990, **10**(1): 1 - 7.
- [8] 黄大国. 影响长江中下游滩地杨树净光合速率的生理生态因子的初步研究[J]. 华东森林经理, 2002, **16**(1): 10 - 13. HUANG Daguo. Preliminary studies on relationship between the net photosynthesis rate and eco-physiological factors of poplar on beach land in middle lower reaches area along the Yang-zi river [J]. *East China For Manage*, 2002, **16**(1): 10 - 13.
- [9] LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren. Biosafety and colonization of *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 and its growth promoting effects on poplars [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2013, **97**(24): 10489 - 10498.
- [10] 李冠喜, 吴小芹, 叶建仁. 杨树根际土自毒物质的积累、毒害及生物修复[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, **37**(3): 71 - 76. LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren. Accumulation, toxic properties and bioremediation of autotoxic substance in poplar rhizosphere soil [J]. *J Nanjing F Univ Nat Sci Ed*, 2013, **37**(3): 71 - 76.
- [11] 李冠喜, 吴小芹, 叶建仁. 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦降解特性的研究[J]. 生态学报, 2013, **33**(21): 6885 - 6894. LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren. Study on the characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(20): 6885 - 6894.
- [12] 侯亮. 松树根际高效解磷细菌的筛选及其解磷特性的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.

- HOU Liang. *Studies on Screening of Efficient Phosphate-solubilizing Bacteria in the Rhizosphere of Pine Trees and on Their Characteristics*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [13] 刘辉, 吴小芹, 任嘉红, 等. 荧光假单胞菌及红绒盖牛肝菌接种对 NL-895 杨生长和光合特征的影响[J]. 西部林业科学, 2012, **41**(1): 53 – 59.
- LIU Hui, WU Xiaoqin, REN Jiahong, *et al.* Effect of inoculating *Pseudomonas fluorescens* and *Xerocomus chrysenteron* on growth and photosynthetic characteristics of NL-895 poplar [J]. *J West China For Sci*, 2012, **41**(1): 53 – 59.
- [14] 王晶英, 敖红, 张杰. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 135–136.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134 – 137.
- [16] 余旋, 朱天辉, 刘旭, 等. 不同解磷菌剂对美国山核桃苗生长、光合特性及磷素营养的影响[J]. 果树学报, 2010, **27**(5): 725 – 729.
- YU Xuan, ZHU Tianhui, LIU Xu, *et al.* Effects of different phosphate solubilizing bacteria on growth, photosynthetic characteristics and phosphate nutrition of pecan [J]. *J Fruit Sci*, 2010, **27**(5): 725 – 729.
- [17] 吕德国, 于翠, 秦嗣军, 等. 本溪山樱根部解磷细菌的定殖规律及其对植株生长发育的影响[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(2): 508 – 515.
- LÜ Deguo, YU Cui, QIN Sijun, *et al.* Colonization regulation pattern of phosphobacteria and its effect on the growth and development of *Cerasus sachalinensis* [J]. *Sci Agric Sin*, 2008, **41**(2): 508 – 515.
- [18] 唐菁. 杨树施用细菌肥料的增长效应及作用机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- TANG Jing. *Studies on Promotion of Bacterial Fertilizers on Poplar Growth and Its Mechanism*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2006.
- [19] 陈丹. 杨树解有机磷细菌与菌根真菌互作效应研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- CHEN Dan. *Study on the Interacting Effect Between Organophosphate-Degrading Bacteria and Ectomycorrhizal Fungi for Poplars*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [20] 常河, 朱红惠, 陈杰忠, 等. 土著 AM 真菌对荔枝实生苗生长和光合特性的影响[J]. 热带作物学报, 2009, **30**(7): 912 – 917.
- CHANG He, ZHU Honghui, CHEN Jiezhong, *et al.* Influence of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi on growth and photosynthesis of litchi seedlings [J]. *Chin J Tropic Crop*, 2009, **30**(7): 912 – 917.
- [21] 刘军辉. 中林 46 杨胶合板用材林施肥与营养诊断研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
- LIU Junhui. *The Study on Fertilization and Nutrient Diagnosis of Poplar ZL-46 Plantation for Plywood* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2006.