

文章编号:1673-1689(2009)05-0693-06

沼泽红假单胞菌的培养和生产番茄红素的优化控制

包有霞, 陈碧霄, 闫震, 丛君, 石晶, 闫海*

(北京科技大学应用科学学院, 北京 100083)

摘要: 围绕沼泽红假单胞菌的高效培养和生产番茄红素的优化控制条件进行研究, 结果表明, 乙酸钠、双乙酸钠、柠檬酸三钠或丙酸钠均可以作为唯一有机碳源支持沼泽红假单胞菌的生长, 培养 5 d 后细胞浓度均可达到 6×10^9 /mL 以上; 如果采用乙酸钠作为碳源, 添加 0.1 g/L 山梨酸钾和 10 g/L 氯化钠可以促进沼泽红假单胞菌的生长, 培养 5 d 细胞浓度高达 8×10^9 /mL 以上。进一步研究发现以丙酸钠为唯一有机碳源时, 培养出的沼泽红假单胞菌细胞番茄红素质量分数最高达 6.66 g/kg, 比生长于乙酸钠的提高了 77.8%。

关键词: 沼泽红假单胞菌; 培养; 番茄红素

中图分类号: TQ 466.1; TQ 924; Q 562

文献标识码: A

Optimal Control for the Culture and Production of Lycopene of *Rhodospseudomonas palustris*

BAO You-xia, CHEN Bi-xiao, YAN Zhen, CONG Jun, SHI Jiao, YAN Hai*

(School of Applied Science, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of nutrient component on the growth of *Rhodospseudomonas palustris* and lycopene production was investigated. It was found that sodium acetate, sodium diacetate, sodium citrate or sodium propionate could be used as sole carbon source to support the growth of *R. palustris*, and more than 6×10^9 /mL cell was achieved after 5 days cultivation, respectively. 0.1 g/L potassium sorbate and 10 g/L sodium chloride were found to stimulate the growth of *R. palustris* with sodium acetate as carbon source, and more than 8×10^9 /mL of *R. palustris* was obtained. Among of those carbon source, sodium acetate was the optimal carbon source for *R. palustris* growth but sodium propionate was the optimal carbon source for the lycopene production (6.66 g/kg dry cell), was higher 77.8% than that of sodium acetate case. The results present here give a potential base for the lycopene industrial production.

Key words: *Rhodospseudomonas palustris*, culture, lycopene

光合细菌 (Photosynthetic Bacteria, 简称 PSB) 是不进行不放氧光合作用的一大类细菌的总称, 其中

沼泽红假单胞菌 (*Rhodospseudomonas palustris*) 是研究和应用最广泛的一种光合细菌, 属于外硫红

收稿日期: 2008-11-05

基金项目: 北京市教委专利转化项目 (200702)。

* 通讯作者: 闫海 (1962-), 男, 北京人, 工学博士, 教授, 主要从事微生物和微藻的研究。Email: haiyan@sas.ustb.edu.cn

螺菌科,红假单胞菌属^[1-3]。PSB在水产养殖和生产番茄红素、氢气、辅酶Q,以及作为微生物肥料和水质净化等方面有广泛的应用前景^[4]。

番茄红素(Lycopene)是一种重要的类胡萝卜素,具有猝灭单线态氧、清除自由基、诱导细胞间连接通信、调控肿瘤细胞等多种生物学功能^[5-6]。在所有天然类胡萝卜素中,番茄红素对单线态氧的猝灭速率最高,是维生素E的100倍,是 β -胡萝卜素的2倍多^[7],在保护淋巴细胞免受自由基造成的细胞膜损害或细胞致死的能力较其它类胡萝卜素强^[8]。番茄红素在动物体内不能合成,医学研究表明一个成年人一天需摄入20~30 mg番茄红素才能满足机体的正常生理需要^[9]。一般认为番茄红素主要由番茄产生,但研究发现PSB也可以合成大量的番茄红素^[10-12]。利用PSB生产番茄红素具有生长速度快、生长周期短、生产成本低和番茄红素含量高等优点,有望取代番茄作为生产番茄红素的重要生物资源。但在如何调控PSB生长所需的有机碳源以获得高产番茄红素方面却未见有研究报道。

本文围绕不同有机碳源对沼泽红假单胞菌生长和产番茄红素的效应进行了比较系统的阐述。研究发现,乙酸钠是支持沼泽红假单胞菌生长的最好碳源,而生长于丙酸钠的沼泽红假单胞菌含番茄红素量最高。这在国内外均未见有研究报道,在番茄红素的生产方面具有重要的意义与价值。

1 材料与方 法

1.1 材 料

实验所用的菌种为沼泽红假单胞菌(*Rhodospirillum rubrum*),购自中国微生物菌种保藏委员会普通微生物中心,菌种编号1.2352。番茄红素标准品, Sigma公司生产,纯度98%。

1.2 研究方 法

1.2.1 培养条件 根据文献报道^[13]配制沼泽红假单胞菌培养基,其中有机碳源分别有乙酸钠、乳酸钠、双乙酸钠、丙酸钠或柠檬酸三钠,有机碳含量都为1.0 g/L。所用培养基及器皿全部经过121 ℃ 20 min的高温高压灭菌后使用。沼泽红假单胞菌培养于密闭的500 mL容积透明玻璃瓶中,培养量500 mL,在智能光照培养箱中白炽灯持续光照下静置厌氧培养,温度30 ℃,光照强度3 000 lx。

1.2.2 生长测定 样品稀释20倍后采用分光光度计在500 nm下测定培养物的吸光度($OD_{500\text{ nm}}$),计算出实际 $OD_{500\text{ nm}}$ 值以示沼泽红假单胞菌的生

长^[14],经实验计算1.2 $OD_{500\text{ nm}}$ 对应细胞浓度为 10^9 /mL。

1.2.3 番茄红素提取 采用转速15 000 r/min离心20 min收获细胞,真空干燥后加入甲醇和正己烷混合溶液(体积比1:1),在细胞破碎仪(输出功率400 W)破碎细胞20 min后,再经转速15 000 r/min离心20 min,取上清液测定番茄红素。

1.2.4 番茄红素测定 根据文献报道^[9],利用高效液相色谱(HPLC)定量测定番茄红素浓度,实验条件是:岛津SPD-M10Avp二极管阵列检测器, Zorbax SB-C₁₈(4.6 mm×25 cm)分离柱,流动相是乙腈/甲醇/三氯甲烷(体积比42.5:42.5:15),体积流量为1 mL/min,进样量20 μ L,检测波长473 nm。

2 结果与讨论

2.1 不同培养条件对沼泽红假单胞菌生长的影响效应

2.1.1 不同有机碳源对沼泽红假单胞菌生长的影响效应 图1显示不同有机碳源对沼泽红假单胞菌生长的影响效应,结果表明虽然所采用的不同有机碳化合物均能够作为惟一有机碳源支持沼泽红假单胞菌的生长,但乙酸钠是支持沼泽红假单胞菌持续快速生长的最好有机碳源,培养3 d后 $OD_{500\text{ nm}}$ 达9.74,对应细胞浓度为 8.12×10^9 /mL,高于梁丽琨等^[15]报道的 6×10^9 /mL。以培养5 d后的结果比较,支持沼泽红假单胞菌生长由好到差的顺序是乙酸钠、双乙酸钠、柠檬酸三钠、丙酸钠和乳酸钠。据文献报道,沼泽红假单胞菌可以利用多种不同有机碳源作为惟一碳源进行异养生长^[15-20]。周茂洪^[18]发现乳酸钠、醋酸钠、丙酮酸、苹果酸和丁二酸对其分离得到的4株沼泽红假单胞菌W₁~W₄都是最适宜碳源。蔡慧农等^[19]研究表明,沼泽红假单胞菌PSB-J030323利用乳酸为碳源时生长最好。此外,李东风等^[16]和刘德海等^[20]均报道沼泽红假单胞菌以乙酸钠为碳源时生长最快,这与本研究的结果一致。由此可见不同PSB株对不同有机碳源的利用能力存在差异,因此可以通过控制碳源优化获得较高细胞浓度的沼泽红假单胞菌。

2.1.2 山梨酸钾对沼泽红假单胞菌生长的影响效应 图2显示采用乙酸钠作为惟一有机碳源,添加不同质量浓度山梨酸钾后对沼泽红假单胞菌生长的影响效应。结果表明0.1 g/L山梨酸钾对沼泽红假单胞菌生长有促进作用,培养5 d后 $OD_{500\text{ nm}}$ 达9.6,对应细胞浓度为 8×10^9 /mL,而0.5 g/L以上

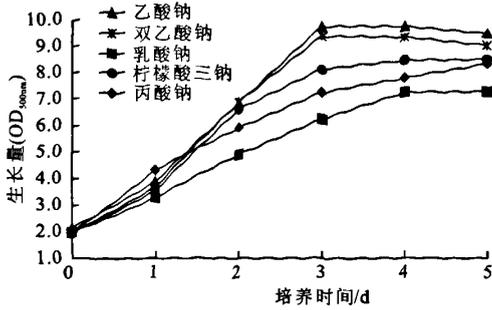


图 1 不同有机碳源对沼泽红假单胞菌生长的影响效应

Fig. 1 Effect of carbon sources on the growth of *R. palustris*

山梨酸钾却明显抑制了沼泽红假单胞菌的生长。山梨酸钾能有效地抑制霉菌、酵母菌、好氧性细菌等的活性,但对厌氧性芽孢菌、嗜酸乳杆菌等几乎没有影响^[21-22]。王柏琴等^[21]报道低质量浓度山梨酸钾可以抑制杂菌生长,但对植物乳杆菌、啤酒片球菌的生长却没有明显抑制作用。本实验结果也证明低质量浓度山梨酸钾可以促进沼泽红假单胞菌的生长(图 2),这在进一步扩大培养 PSB 过程中抑制杂菌生长方面具有重要意义。

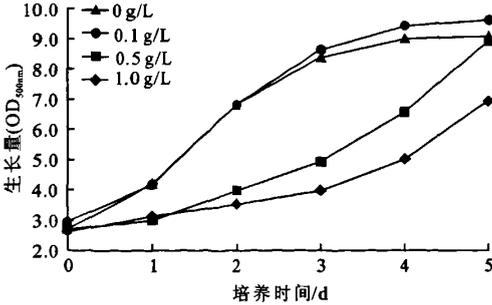


图 2 不同质量浓度山梨酸钾对沼泽红假单胞菌生长的影响效应

Fig. 2 Effect of potassium sorbate content on the growth of *R. palustris*

2.1.3 氯化钠对沼泽红假单胞菌生长的影响效应

图 3 显示不同质量浓度氯化钠对沼泽红假单胞菌生长的影响效应,结果表明氯化钠质量浓度在 10~20 g/L 范围内对沼泽红假单胞菌生长有明显的促进作用,但不添加氯化钠或氯化钠质量浓度过高(40 g/L)则不利于沼泽红假单胞菌的生长。在 10 g/L NaCl 条件下,培养 4d 后 OD_{500nm} 达 10.1,对应细胞浓度高达 8.44×10^9 /L。据文献报道^[23-26],PSB 需要在适合盐度下方能生长良好,而添加氯化钠可以调节培养基盐度。刘德海等^[20]报道,沼泽红

假单胞菌在氯化钠质量浓度 0.5~2 g/dL 范围内生长最好。谷志静等^[23]发现海洋光合细菌 Rx 菌株在氯化钠质量浓度 2.5 g/dL 的高盐环境下生长最好。而沈锦玉等^[24]则认为光合细菌 HZPSB 菌株生长的最佳盐度(质量分数)为 0.1%,适宜盐度(质量分数)是 0.1%~0.2%。本研究沼泽红假单胞菌在氯化钠质量浓度 1 g/dL 时生长最快,合适的盐度可以明显促进沼泽红假单胞菌生长。

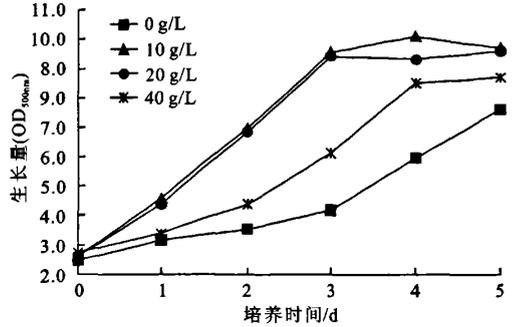
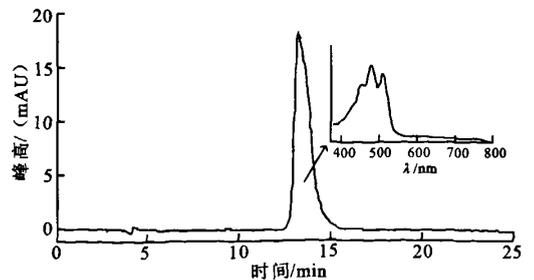


图 3 不同质量浓度氯化钠对沼泽红假单胞菌生长的影响效应

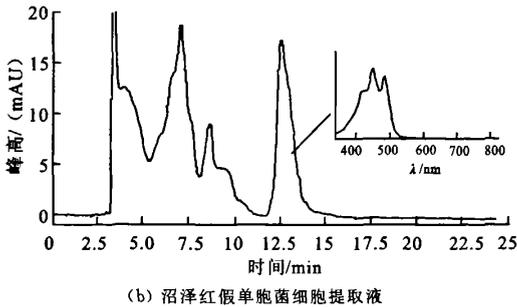
Fig. 3 Effect of sodium chloride content on the growth of *R. palustris*

2.2 沼泽红假单胞菌含有番茄红素的确认

图 4 为 10.0 mg/L 番茄红素标准品溶液及从沼泽红假单胞菌细胞中提取番茄红素的 HPLC 图谱和可见光扫描图谱。番茄红素标准品在 HPLC 测定的出峰保留时间为 13 min(图 4 a),沼泽红假单胞菌细胞粗提物 HPLC 图谱在相同保留时间也有一个明显的出峰(图 4 b)。另外,此出峰的 400~800 nm 可见光扫描图谱与番茄红素标准品出峰此波长区间内的可见光扫描图谱一致,相似系数(Similarity Index)为 0.994,这证明本研究用沼泽红假单胞菌确实能够产生番茄红素。此前姜大伟^[10]研究发现 11 株产番茄红素的 PSB;王俊卿等^[11]报道沼泽红假单胞菌高产番茄红素,因此沼泽红假单胞菌可以作为生产番茄红素的新生物资源。



(a)10.0 mg/L 番茄红素标准品溶液



(b) 沼泽红假单胞菌细胞提取液

图4 番茄红素标准品和沼泽红假单胞菌细胞提取液
的HPLC图谱Fig. 4 HPLC chromatogram profiles of standard lycopene and the crude extracting solution from *R. palustris*

2.3 不同有机碳源培养对沼泽红假单胞菌产番茄红素的影响效应

利用单因素方差统计对5种有机碳源条件下沼泽红假单胞菌产番茄红素量进行分析(表1),结果显示5种不同有机碳源对沼泽红假单胞菌产番茄红素量的影响存在极显著的差异($F=2\,419.84$, $p<0.05$),表明不同的有机碳源可以显著地影响沼泽红假单胞菌产番茄红素量。

表1 5种有机碳源对沼泽红假单胞菌产番茄红素量的
单因素方差分析

Tab. 1 The analysis of variance of five kinds different carbon sources

差异源	SS	DF	MS	F	P-value	$F_{0.05}$
碳源	241 615.8	4	60 403.96	2 419.84	2.12×10^{-8}	5.19
组内	124.8	5	24.96			
总变异	241 740.6	9				

图5显示分别生长于丙酸钠、乙酸钠、双乙酸钠、柠檬酸三钠和乳酸钠的沼泽红假单胞菌细胞中的番茄红素含量。结果表明生长于丙酸钠的沼泽红假单胞菌细胞含有番茄红素量最高,达6.66 g/kg;其次为生长于乙酸钠的沼泽红假单胞菌,含番茄红素量为3.742 g/kg;而生长于乳酸钠的沼泽红假单胞菌含番茄红素量最低,仅为2.306 g/kg。顾秋亚^[27]等研究发现,丙酸钠可以抑制三孢布拉霉中 β -胡萝卜素的合成。番茄红素是生物合成 β -胡萝卜素生物合成的前体^[28],丙酸钠对沼泽红假单胞菌产番茄红素能力的促进作用可能是由丙酸钠抑制 β -胡萝卜素的合成所引起,从而导致番茄红素的积累。

据报道^[27-29],目前生产番茄红素的最主要资源番茄其果实每百克含番茄红素3~14 mg,每百克果皮含番茄红素20 mg,远远低于本研究沼泽红假单胞菌的番茄红素含量。此外,薛姣等^[28-30]报道采用基因工程重组的PSB可以使番茄红素质量分数提高到1.52 g/kg。钱卫等^[29-31]研究了紫色非硫细菌的培养控制条件,使番茄红素质量分数更进一步提高到了3.987 g/kg,与本研究生长于乙酸钠沼泽红假单胞菌含番茄红素量基本相当,但仍然远远低于生长于丙酸钠的沼泽红假单胞菌的番茄红素含量(图5)。说明采用不同碳源培养,不仅使沼泽红假单胞菌的生长产生较大差异,而且对产番茄红素量也产生较大的不同影响。本研究发现乙酸钠可以支持沼泽红假单胞菌最好的生长,而丙酸钠可以最大程度提高沼泽红假单胞菌的番茄红素产量,至今尚未发现有此研究结果的报道,这在沼泽红假单胞菌的培养和高产番茄红素方面具有重要意义。

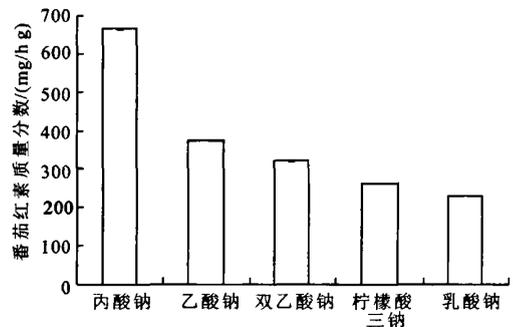


图5 不同有机碳源培养时沼泽红假单胞菌细胞中番茄红素的产量

Fig. 5 Recovery of lycopene from *R. palustris* cells cultured with different carbon sources

3 结 语

与双乙酸钠、乳酸钠、柠檬酸三钠或丙酸钠相比,乙酸钠是支持沼泽红假单胞菌生长的最好有机碳源,培养5 d可以获得 8×10^9 /mL的沼泽红假单胞菌细胞浓度。采用乙酸钠作为唯一有机碳源,添加0.1 g/L山梨酸钾或10 g/L氯化钠可以进一步促进沼泽红假单胞菌的生长。

与乙酸钠、双乙酸钠、乳酸钠或柠檬酸三钠相比,生长于丙酸钠的沼泽红假单胞菌含番茄红素量最高,达到了6.66 g/kg,比生长于其他有机碳源沼泽红假单胞菌含番茄红素量高出约一倍,这对采用PSB生产番茄红素的产业化具有非常重要的价值。

参考文献(References):

- [1] 李彦芹, 阎振荣, 穆淑梅, 等. 光合细菌研究进展[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 554-560.
LI Yan-qin, KAN Zhen-rong, MU Shu-mei, et al. Study progress of photosynthetic bacteria [J]. *Journal of Hebei University: Natural Science Edition*, 2005, 25(5): 554-560. (in Chinese)
- [2] 王兰, 廖丽华. 光合细菌的分离鉴定及对养殖水的净化研究[J]. 微生物学杂志, 2004, 24(2): 7-10.
WANG Lan, LIAO Lihua. Separation and identification of photosynthetic bacteria (PSB) and purifying effection aquaculture water [J]. *Journal of Microbiology*, 2004, 24(2): 7-10. (in Chinese)
- [3] 同光. 沼泽红假单胞菌和红螺菌对水体净化作用的初步研究[J]. 化工职业技术教育, 2007(3): 33-37.
Yan Guang. Preliminary study of *Rhodopseudomonas palustris* and *Rhodospirillum* using in water purification [J]. *Chemical Vocational and Technical Education*, 2007(3): 33-37. (in Chinese)
- [4] 吴向华, 杨启银, 刘五星, 等. 光合细菌的研究进展及其应用[J]. 中国农业科技导报, 2004, 6(2): 35-38.
WU Xiang-hua, YANG Qi-yin, LIU Wu-xing, et al. Application and research progress of photosynthetic bacteria [J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2004, 6(2): 35-38. (in Chinese)
- [5] 钱卫, 王肇颖, 韩波, 等. 光合细菌中番茄红素的研究[J]. 山东大学学报, 2004, 29(3): 110-115.
QIAN Wei, WANG Zhao-ying, HAN Bo, et al. Studies of lycopene from photosynthetic bacteria [J]. *Journal of Shandong University*, 2004, 29(3): 110-115. (in Chinese)
- [6] 陈锦屏, 孙灵霞, 段玉峰. 番茄红素性质及提取方法研究进展[J]. 粮食与油脂, 2004(8): 50-53.
CHEN Jin-Ping, SUN Ling-xia, DUAN Yu-feng. Research advance of methods about extracting lycopene and its property [J]. *Journal of Cereals & Oils*, 2004(8): 50-53. (in Chinese)
- [7] Mascio D. Lycopene as the most efficient biological carotenoid single oxygen quencher[J]. *Arch Biochem Biophys*, 1989, 274: 532-538.
- [8] 横田正. 番茄红素与癌[J]. 新食品工业, 1997(2): 73-78.
HENG Tian-zheng. Lycopene and cancer [J]. *New Food Industry*, 1997(2): 73-78. (in Chinese)
- [9] 李亚珍. 植物化学物——番茄红素与人体健康[J], 2007, 4(2): 42-45.
LI Ya-zhen. Botanic chemical-lycopene and human health [J]. *Journal of Hetao University*, 2007, 4(2): 42-45. (in Chinese)
- [10] 姜大伟. 番茄红素生产菌株的筛选[J]. 现代食品科技. 2007, 23(8): 20-22.
JIANG Da-wei. Screening of lycopene-produced strains from the photo synthetic bacteria [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2007, 23(8): 20-22. (in Chinese)
- [11] 王俊卿, 张肇铭. 沼泽红假单胞菌的番茄红素含量[J]. 应用与环境微生物学报, 2004, 10(5): 660-662.
WANG Jun-qing, ZHANG Zhao-ming. Production of lycopene by *Rhodopseudomonas palustris* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2004, 10(5): 660-662. (in Chinese)
- [12] Synnøve Liaen Jensen, Germaine Cohen-Bazire, Nakayama T O M, et al. The path of carotenoid synthesis in a photosynthetic bacterium [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1958, 29(3): 477-498.
- [13] 许芳, 张淑荣, 张鹏. 酶解和冻融辅助超声提取光合细菌中辅酶 Q10 的研究[J]. 化学与生物工程, 2008, 25(8): 43-45.
XU Fang, ZHANG Shu-rong, ZHANG Peng. Study of extracting CoQ10 from photosynthetic bacteria by ultrasonic assisted with zymolysis or freezing-thawing [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2008, 25(8): 43-45. (in Chinese)
- [14] 闫海, 马翠杰, 孙旭东, 等. 铝絮凝剂絮凝沼泽红假单胞菌研究[J]. 化学与生物工程, 2008, 25(6): 53-55.
YAN Hai, MA Cui-jie, SUN Xu-dong, et al. Study on flocculation of *Rhodopseudomonas palustris* by aluminum flocculants [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2008, 25(6): 53-55. (in Chinese)
- [15] 梁丽珉, 鞠宝, 郭承化. 深层液体培养法生产沼泽红假单胞菌[J]. 微生物学杂志, 2002, 22(5): 9-11.
LIANG Li-kun, JU Bao, GUO Cheng-hua. Submerged culture of *Rhodopseudomonas palustris* [J]. *Journal of Microbiology*, 2002, 22(5): 9-11. (in Chinese)
- [16] 李东风, 杜近义. 沼泽红假单胞菌培养条件的初步研究[J]. 微生物学杂志, 1996, 16(2): 27-30.
Li Dong-feng, Du Jin-yi. Preliminary study on the conditions for the growth of strain P3. 9 of *Rhodopseudomonas palustris* [J]. *Journal of Microbiology*, 1996, 16(2): 27-30. (in Chinese)
- [17] 杨素萍, 赵春贵, 刘瑞田, 等. 沼泽红假单胞菌乙酸光合放氢研究[J]. 生物工程学报, 2002, 18(4): 486-491.
YANG Su-ping, ZHAO Chun-gui, LIU Rui-tian, et al. Hydrogen photoproduction from acetate by *Rhodopseudomonas palustris* [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2002, 18(4): 486-491. (in Chinese)

- [18] 周茂洪. 几株沼泽红假单胞菌的分离和分类特性研究[J]. 微生物学杂志, 2001, 21(3): 20-23.
ZHOU Mao-hong. Isolation and classification of several strains of *Rhodospseudomonas palustris* [J]. **Journal of Microbiology**, 2001, 21(3): 20-23. (in Chinese)
- [19] 蔡慧农, 倪辉, 苏文金. 沼泽红假单胞菌培养基的优化及降氨氮作用的研究[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2007, 12(3): 198-203.
CAI Hui-nong, NI Hui, SU Wen-jin. Optimization for culturing *Rhodospseudomonas palustris* and studies on its capability of removing ammonia nitrogen from water system [J]. **Journal of Jimei University: Natural Science**, 2007, 7, 12(03): 198-203. (in Chinese)
- [20] 刘德海, 安明理, 王红云, 等. 沼泽红假单胞菌发酵工艺研究[J]. 中国饲料, 2007(16): 20-22.
LIU De-hai, AN Ming-li, WANG Hong-yun, et al. Selection of *R. Palustris* and its *Production conditions* [J]. **China Feed**, 2007(16): 20-22. (in Chinese)
- [21] 王柏琴. 红曲色素、乳酸链球菌素、山梨酸钾对乳酸菌株的影响[J]. 食品与发酵工业, 1996(2): 5-9.
WANG Bai-qin. Effect of monascorubin, nisin, potassium sorbate on strains of lactic acid bacteria [J]. **Food and Fermentation Industries**, 1996(2): 5-9. (in Chinese)
- [22] 冯慧慧, 刘庆军. 新型食品防腐剂——山梨酸钾的抑菌原理与应用[J]. 山东食品, 1998(3): 45-47.
FENG Zi-hui, LIU Qing-jun. Application and antibacterial principle of a new food preservative-potassium sorbate [J]. **Shandong Food Fermentation**, 1998(3): 45-47. (in Chinese)
- [23] 谷志静, 陈锡时, 韩士杰, 等. 海洋光合细菌 Rx 菌株的分离鉴定与生物学特性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 31-36.
GU Zhi-jing, CHEN Xi-shi, HAN Shi-jie, et al. Identification and biological characteristics of marine photosynthetic bacterium strain Rx [J]. **Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition**, 2004, 32(9): 31-36. (in Chinese)
- [24] 魏玉利, 邹宁, 邱芳蕾. 光合细菌几种培养方式的比较[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(29): 9126-9127.
WEI Yu-li, ZOU Ning, QIU Fang-lei. Comparison of several cultivation methods for photosynthetic bacteria [J]. **Journal of Anhui Agricultural Sciences**, 2007, 35(29): 9126-9127. (in Chinese)
- [25] 孙勇, 谢数涛, 杨泽民, 等. 一株富含类胡萝卜素光合细菌的分离鉴定[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 146-151.
SUN Yong, XIE Shu-tao, YANG Ze-ming, et al. Isolation and identification of a strain of photosynthetic bacteria with high-yield production of carotenoid pigments [J]. **Journal of Jinan University**, 2006, 27(1): 146-151. (in Chinese)
- [26] 沈锦玉, 刘向, 尹文林, 等. 光合细菌 HZPSB 菌株的分离鉴定及其生长特性的测定[J]. 科技通报, 2005, 21(1): 69-93.
SHEN Jin-yu, LIU Wen, YIN Wen-lin, et al. Isolation, Identification and characteristics of photosynthetic bacteria HZ-PSB strain [J]. **Bulletin of Science and Technology**, 2005, 21(1): 69-93. (in Chinese)
- [27] 顾秋亚, 余晓斌, 解书怀. 三孢布拉霉异菌株接合孢子的形成与 β -胡萝卜素合成关系的研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(3): 73-75.
GU Qiu-ya, YU Xiao-bin, XIE Shu-huai. Study on correlation between the synthesis of β -carotene and zygote formation by *Blakeslea trispora* heterothallic strains [J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2008, 29(3): 73-75. (in Chinese)
- [28] 王岁楼, 张平之. β -胡萝卜素的生物合成与发酵促进剂[J]. 生物学杂志, 2000, 17(3): 4-5.
WANG Sui-lou, ZHANG Ping-zhi. The biosynthesis of β -carotene and fermentation promoter [J]. **Journal of Biology**, 2006, 17(3): 4-5. (in Chinese)
- [29] 姜媛媛, 李达, 刘爽, 等. 光合细菌产番茄红素的研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2006, 12(85): 39-41.
JIANG Yuan-yuan, LI Da, LIU Shu-ang, et al. Research on producing lycopene with photosynthesis bacterium [J]. **RODUCTS rocessing**, 2006, 85(12): 39-41. (in Chinese)
- [30] 薛姣, 胡宗利, 陈国平, 等. 番茄红素的新型生产途径研究[J]. 广东农业科学, 2008(6): 83-87.
XUE Jiao, HU Zong-li, CHEN Guo-ping. Study on the novel producing approach of lycopene [J]. **Guangdong Agricultural Sciences**, 2008(6): 83-87. (in Chinese)
- [31] 钱卫, 王肇颖, 韩波, 等. 光合细菌中番茄红素的研究[J]. 山东大学学报: 理学版, 2004, 39(3): 111-115.
QIAN Wei, WANG Zhao-ying, HAN Bo, et al. Studies of lycopene from photosynthetic bacteria [J]. **Journal of Shandong University: Natural Science**, 2004, 39(3): 111-115. (in Chinese)

(责任编辑: 秦和平)