

餐厨垃圾废水制备液态解磷菌剂研究

郭新愿^{1,2}, 祁光霞², 王永京², 李雨桥², 张希², 李冬¹, 任连海^{2*} (1.北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022; 2.北京工商大学环境科学与工程系, 北京 100048)

摘要: 本研究探讨了餐厨垃圾废水用作发酵基质生产液态解磷巨大芽孢杆菌菌肥的可行性。结果表明,餐厨垃圾废水培养的巨大芽孢杆菌经过 3~4d 的调整期即进入对数生长期,第 6~7d 活菌数达到最大,而经过湿热预处理得到的 II 类废水较 I 类废水更适宜用作巨大芽孢杆菌的培养基质,其菌液活菌数是 I 类废水培养的活菌数的 5 倍(4.8×10^{15} CFU/mL)。废水中的盐分对巨大芽孢杆菌的生长代谢影响显著:活菌数随着 NaCl 含量的增加先升高后快速降低,最利于菌种培养的 NaCl 浓度为 10g/L。pH 值和温度极显著影响巨大芽孢杆菌的生长,而摇床转速和接种量对菌株培养影响不显著,正交试验确定的较优培养条件为 pH=8、 $T=35^\circ\text{C}$ 、转速 80r/min、接种量 2%(V/V)。餐厨垃圾废水制备的解磷菌肥可实现土壤中固化磷的有效磷化:施用 0.025%~2.5%质量比例解磷菌剂的土壤生长的黄豆苗干重可达到按照 5%质量比例施加无机复合肥生长的黄豆苗的 70.7%~84.5%,其中微生物菌肥的最佳施用量为 0.25%。

关键词: 餐厨垃圾废水; 液态菌肥; 解磷菌; 巨大芽孢杆菌; 资源化

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)11-3422-07

Preparation of liquid bacterial fertilizer of phosphate-solubilizing bacteria from food waste-recycling wastewater. GUO Xin-yuan^{1,2}, QI Guang-xia², WANG Yong-jing², LI Yu-qiao², ZHANG Xi², LI Dong¹, REN Lian-hai^{2*} (1.College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2.Department of Environmental Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China). *China Environmental Science*, 2016,36(11): 3422~3428

Abstract: The feasibility of using food waste-recycling wastewater as fermentation substrate for producing liquid phosphate-solubilizing bacillus megaterium fertilizer was investigated. The results showed that *bacillus megaterium* cultured in the food waste-recycling wastewater reached logarithmic growth stage in as short as 3~4 days of adaptation period, and the number of strains reached the maxima on the 6~7th day. The wastewater II generated from hydrothermal pre-treatment was more suitable to be the fermentation substrate than wastewater I. The strain numbers cultured in wastewater II was 5times of what was cultured in wastewater I (4.8×10^{15} CFU/mL). Salt concentration in the wastewater had great influence on the growth and metabolism of *Bacillus megaterium*: the strain numbers first increased and then steeply decreased with the increase of NaCl concentration, indicating that the optimal NaCl concentration for bacterial culture was 10g/L. The variation of pH and temperature affected the growth of bacillus megaterium significantly, while shaking speed and strain inoculation volume were not key influencing factors. The optimal culture conditions were pH 8, $T=35^\circ\text{C}$, shaking speed 80r/min, and inoculums of 2%(V/V) as determined by orthogonal experiment. Phosphate-solubilizing fertilizer prepared by food waste-recycling wastewater was able to achieve effective phosphating of immobilized phosphorus: the dry weight of soy beans grown in soils amended with 0.025%~2.5% of phosphate-solubilizing fertilizer was 70.7%~84.5% of that grown in the soil amended with 5% of inorganic fertilizer on weight basis. Moreover, the optimal amended ratio of the microbial fertilizer was 0.25%.

Key words: food waste-recycling wastewater; liquid bacterial fertilizer; phosphate-solubilizing bacteria; *Bacillus megaterium*; reutilization

收稿日期: 2016-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578008);“十二五”国家科技支撑计划课题(2014BAC27B01-03);北京工商大学两科基金培育项目(LKJJ2016-17).

* 责任作者, 教授, renlh@th.btbu.edu.cn

餐厨垃圾废水指餐厨垃圾经过固液分离并去除大部分废弃油脂的高浓度有机废水^[1],其高效、低成本妥善处理对于实现餐厨垃圾的无害化和资源化具有重要意义^[2]。目前,针对全球能源短缺的现状,国内外学者对餐厨垃圾废水主要采用生物处理法,包括厌氧消化^[3-8]、MBR 工艺^[9-13]等,由此却带来了厌氧消化沼液的处理难题。事实上,餐厨垃圾废水有机质含量高(COD 60~120g/L),营养物质丰富(TN 1000~4000mg/L, TP 9~350mg/L)^[1,6],重金属和毒性有机物含量低,可为微生物生长代谢提供优质碳源和能源,可用于微生物菌剂生产,如木霉微生物肥料^[14]。目前,微生物菌肥多以富含有机质的固体或液体为载体,通过接种高效菌株进一步发酵获得,利用餐厨垃圾制备微生物菌肥已经多有尝试^[15-17],但利用餐厨垃圾废水生产液态菌肥的研究还鲜有报道。结合我国土壤大面积缺磷的现状(2/3~3/4)^[18-19],而利用微生物活化土壤中的固化磷是现代生态农业提高土壤肥力^[20]、防治病原菌^[21]、增加作物产量^[21-24]、降解有机农药^[25]的新途径,本研究旨在探究餐厨垃圾废水用作发酵基质生产液态解磷菌肥的可行性,优化培养条件,同时验证液态菌肥的土壤有效磷化效果和促进作物生长效果,为餐厨垃圾废水的低成本、高附加值资源化利用提供一条新思路,从而规避餐厨垃圾废水传统生物处理带来的厌氧消化沼液处理难题。

1 材料与方 法

1.1 材 料

解磷巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)购自中国微生物保藏中心,于 4℃ 保存备用。

餐厨垃圾取自北京工商大学东区和西区食堂,根据餐厨垃圾目前常用的处理工艺,获得两类餐厨垃圾废水:(1)将餐厨垃圾经 20 目不锈钢孔径滤网过滤,固液分离,分离出的液体再经 3000r/min 离心 20min(20℃),撇除浮油取液体部分,记作 I 类废水;(2)将餐厨垃圾破碎后加入湿热反应器,在 100℃ 水热反应 3h。将湿热处理后的样品经 3000r/min 离心 20min(20℃),撇除浮油取液体部分,记作 II 类废水。废水经 121℃ 高压蒸汽灭

菌 20min 备用,其基本理化性质见表 1。

表 1 餐厨垃圾废水基本理化性质参数

Table 1 The physicochemical parameters of wastewater produced from food waste recycling

指标参数	I 类废水	II 类废水
pH 值	5.91	5.58
COD (g/L)	150.4	200.4
TP (mg/L)	5.7×10^{-3}	5.6×10^{-3}
TN (mg/L)	2510.3	2919.3
NaCl (g/L)	1.76	1.19

盆栽试验所用土壤取自北京工商大学花园,分拣出石头砖块、植物残根等,混合均匀,风干,过 20 目筛备用。土壤 pH 值为 6.92,土壤总磷、有效磷、总氮、速效钾和有机质含量依次分别为 438.5,2.64,527.5,35.6,1072.6mg/kg。

盆栽作物为超市购买黄豆,选取大小均一、颗粒饱满的黄豆备用。

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、NaOH、 H_3BO_3 、浓 HCl 和 AgNO_3 购自北京化工厂,甲基红和溴甲酚绿购自天津市光复精细化工研究所,浓 HNO_3 购自国药集团化学试剂有限公司。所有化学试剂均为分析纯。试验用去离子水由 ZYpure-ED1a-100-UP 型高纯水系统一体机(北京中扬永康环保科技有限公司)制备得到。

种子培养基为牛肉膏蛋白胨培养基:蛋白胨 10.0g,牛肉膏 3.0g,NaCl 5.0g,琼脂 20.0g,去离子水 1000mL,pH 7.0;液体有机磷培养基: $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 4.0g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1.0g,葡萄糖 20.0g,NaCl 0.3g, FeSO_4 0.03g,酵母膏 1.5g,去离子水 1000mL,卵磷脂大量,pH 值 7.5。

1.2 仪器与设备

KDC-160HR 型离心机,科大创新股份有限公司;LRH-250 型生化培养箱,上海恒科技术有限公司;VD-1320 型超净工作台,哈尔滨东联电子技术开发公司;SQ510WGC 型立式压力蒸汽灭菌器,日本 YAMATO 公司;PHS-3D 型 pH 计,上海三信仪表厂;UV-5200 型紫外分光光度计,上海精密仪器仪表有限公司;BX41 型显微镜,日本 OLYMPUS 公司;H2Q-C 型恒温振荡器,金坛市科析仪器有限公司。

1.3 试验方法

解磷巨大芽孢杆菌解磷能力测定:将经活化的巨大芽孢杆菌接种到液体有机磷培养基中,空白接入灭活菌液,于 30℃振荡培养 5d(200r/min),离心得到的上清液采用钼锑抗比色法测定其中有效磷的含量^[26],扣除空白即可得到解磷菌的解磷量.实验设置 2 组平行.

解磷巨大芽孢杆菌生长曲线绘制:在无菌条件下,将经活化的巨大芽孢杆菌菌种由种子培养基按照 2.5%接种量(V/V)接种至液体培养基内培养 24h,于接种后每隔 2h 用紫外-可见分光光度计测定 OD₆₀₀ 值,实验设置 3 组平行.

解磷巨大芽孢杆菌在餐厨垃圾废水的生长曲线绘制:在无菌条件下,将经活化的巨大芽孢杆菌菌种由种子培养基按照 2%接种量(V/V)接种至餐厨垃圾废水于 35℃培养 10d,摇床转速 100r/min,于接种后每隔 1d 记录活菌数量.实验设置 2 组平行.

培养条件正交试验:选择 pH 值(A,pH 6、7、8、9)、温度(B,25℃、30℃、35℃、40℃)、摇床转速(C,80,100,120,140r/min)和接种量(D, V/V=1%、1.5%、2%、2.5%)四个因素,通过 4 因素 4 水平正交试验确定 II 类餐厨垃圾废水培养巨大芽孢杆菌的适宜条件,固定发酵时间为 5d,因素水平见表 2.实验设置 2 组平行.

培养条件单因素试验:在正交试验确定的较优培养条件基础上,重点研究培养 pH 值(4~12)和 NaCl 含量(1.19/1.76~20g/L)对巨大芽孢杆菌生长过程的影响,从而进一步获得优化的培养条件.

盆栽试验:在最佳的温度、pH 值、接种量(V/V)、摇床转速和发酵时间条件下,以餐厨垃圾废水培养解磷巨大芽孢杆菌,得到液态解磷菌剂(I 类废水和 II 类废水培养分别对应 I-P 和 II-P),测定菌剂中活菌数.

将风干土壤样品按照一盆 2.0kg 装盆,每盆播种 10 粒黄豆.盆栽实验设置 5 种处理方式:空白 1(CT1),施加 500mL 去离子水;空白 2(CT2),施加 500mL 质量分数 2%的液态无机复合肥;处理 3(PB1),施加 500mL 按照 1:100 稀释的液态解磷菌剂,施用经稀释的 I-P 和 II-P 分别对应 PB1(I)

和 PB1(II);处理 4(PB2),施加 500mL 按照 1:1000 稀释的液态解磷菌剂,施用经稀释的 I-P 和 II-P 分别对应 PB2(I)和 PB2(II);处理 5(PB3),施加 500mL 按照 1:10000 稀释的液态解磷菌剂,施用经稀释的 I-P 和 II-P 分别对应 PB3(I)和 PB3(II).每种处理设置 3 个平行.盆栽条件为:室温条件(20~25℃),每隔 3d 浇灌去离子水 50mL,种植 25d 后将黄豆拔起,于 50℃烘干至恒重后称重,而土壤样品经烘干测定有效磷含量.

表 2 优化培养条件的 L₁₆(4⁴)正交试验因素与水平
Table 2 Factors and levels of L₁₆(4⁴) orthogonal experiments for the optimization of culture conditions

水平	pH 值 A	温度 (°C)B	摇床转速 (r/min)C	接种量(%)D
1	6	25	80	1
2	7	30	100	1.5
3	8	35	120	2
4	9	40	140	2.5

1.4 分析方法

活菌数量测定采用平板计数法,涂布平板设置 3 个平行.

发酵液中有效磷测定:发酵液经 10000r/min 离心 10min(4℃)得到上清液,鉴于其高有机质含量,采用钼锑抗比色法测定其中有效磷含量^[26].

土壤有效磷测定:取 5.00g 风干土壤样品,放入干燥的血清瓶中,加入 100mL Mehlich-3 萃取溶液,充分振荡 120min,3000r/min 离心 20min,取上清液按照国家标准《水质总磷的测定》^[27]的钼酸铵分光光度法进行测定.

正交试验数据使用 SPSS Statics 20 软件进行处理,以巨大芽孢杆菌活菌数为因变量,以 pH 值、温度、摇床转速和接种量(V/V)为自变量,进行单因变量多因素方差分析,识别对巨大芽孢杆菌培养影响较为显著的关键参数,同时获得较优的培养条件组合.

2 结果与讨论

2.1 解磷巨大芽孢杆菌理化性能

市售巨大芽孢杆菌在种子培养基上培养(活

化),其形态如图 1 所示.巨大芽孢杆菌细胞为杆状的革兰氏阳性菌,呈链状排列,直径大于 1 μm,芽孢为圆形,孢囊不膨大.菌落为淡黄色,边缘整齐,表面光滑,为凸状隆起.

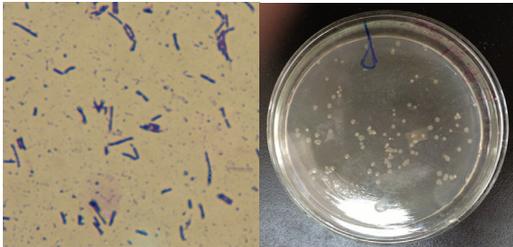


图 1 巨大芽孢杆菌菌株形态特征

Fig.1 Morphological characteristics of *Bacillus megaterium* strain

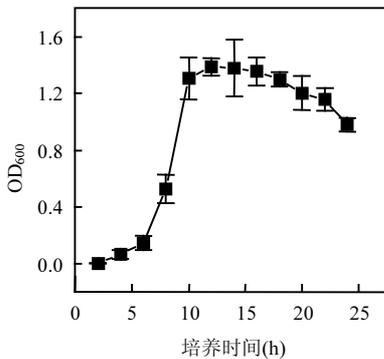


图 2 巨大芽孢杆菌生长曲线

Fig.2 Growth curve of *Bacillus megaterium*

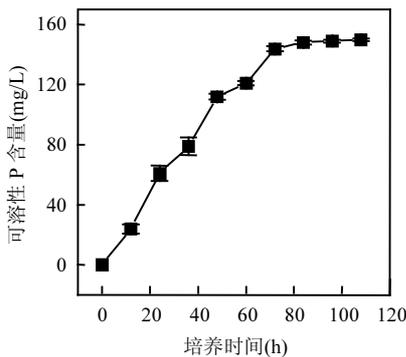


图 3 巨大芽孢杆菌对有机磷的增溶效果

Fig.3 The effect of *Bacillus megaterium* on the solubilization of organic phosphorus

巨大芽孢杆菌培养 6h 进入对数生长期,在 10~14h 后进入稳定期,随后进入衰亡期(图 2);在整个发酵过程中,巨大芽孢杆菌的解磷能力在最

初 72h 快速增加,而 72h 以后菌种解磷能力仅呈现边际增加,发酵液中有效磷含量维持在 150mg/L 左右(图 3).因此,在纯培养条件下该市售解磷巨大芽孢杆菌的解磷能力为 150mg/L,这与已见报导的解磷巨大芽孢杆菌解磷能力相当^[19].

2.2 解磷巨大芽孢杆菌在餐厨垃圾废水中的生长曲线

经种子培养基活化后的巨大芽孢杆菌接种至餐厨垃圾废水后的活菌数随时间变化如图 4 所示.从图中可看出,经过 3~4d 的调整期后,巨大芽孢杆菌进入对数生长期,第 6~7d 活菌数达到最大(I 类废水 9.4×10^{14} CFU/mL,II 类废水 4.8×10^{15} CFU/mL),7d 以后由于废水中碳源和营养物质的消耗进入消亡期,这种消亡过程在经过湿热处理得到的 II 类废水中表现得尤为明显,第 10d 其活菌数较第 7d 下降了 75.1%.

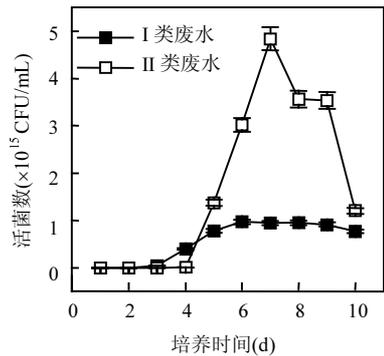


图 4 巨大芽孢杆菌数在餐厨垃圾废水中随时间的变化
Fig.4 Variation curve of the numbers of *Bacillus megaterium* inoculated into the food waste-recycling wastewater as a function of incubation time

接种量 2%(V/V),摇床转速 100r/min,T=35℃,pH 未调

值得注意的是,II 类废水较 I 类废水更适宜用作巨大芽孢杆菌的培养基质,其菌液活菌数是 I 类废水培养的活菌数的 5 倍.II 类废水的 COD 仅比 I 类废水高 33.2%,因此其原因可能在于餐厨垃圾经湿热处理后,其中的大分子有机物的溶解度、液化程度增加,一定比例的微溶性淀粉、蛋白质、脂肪等物质解聚转化为小分子可溶性还原糖、氨基酸和脂肪酸等,这种转化更有利于微生物菌体的消化和吸收.

2.3 解磷巨大芽孢杆菌培养的正交试验优化

鉴于影响微生物培养的条件参数较多,因此选择更适宜制备解磷菌剂的 II 类废水为基质,通过正交试验及方差分析考察温度、pH 值、摇床转速和接种量(*V/V*)对巨大芽孢杆菌培养影响的显著性程度^[28].正交试验的方差分析结果见表 3,pH 值和温度极显著影响巨大芽孢杆菌的生长,而摇床转速和接种量对菌株培养影响不显著,影响的显著程度依次为 pH≈温度>>接种量>摇床转速.而通过极差分析,初步确定较优的培养条件为 A₃B₃C₁D₃,即 pH=8、T=35℃、转速 80r/min、接种量 2%(*V/V*).

表 3 条件参数对巨大芽孢杆菌数量影响的方差分析
Table 3 Variance analysis of the effect of conditional parameters on the numbers of *Bacillus megaterium* strain

参数	平方和	自由度	方差	F 值	显著性
pH 值	40.971	3	13.657	19.28	0.018*
温度	38.422	3	12.807	18.08	0.020*
摇床转速	2.636	3	0.879	1.24	0.432
接种量	8.177	3	2.726	3.84	0.149
误差	2.125	3	0.708		

注：“*”表示影响显著.

2.4 pH 值对解磷巨大芽孢杆菌培养的影响

根据第 2.3 节结果,在培养温度一定条件下,餐厨垃圾废水 pH 极显著影响解磷巨大芽孢杆菌的生长代谢,因而需要进一步研究解磷菌可耐受的 pH 范围.

图 5 显示具有不同 pH 值的 II 类废水按 2% 体积比接种解磷菌后,其中的解磷菌活菌数量变化.由图可知,过酸或过碱的 pH 值均对解磷菌的生长代谢和繁殖不利,最适于解磷巨大芽孢杆菌生长的 pH 值为 8.在 pH=4 和 pH=12 的条件下,II 类废水中的解磷菌活菌数分别仅 6.3×10⁵CFU/mL 和 3.7×10⁶CFU/mL,远远达不到《农用微生物菌剂》国家标准^[29]关于菌剂产品的活菌数要求(2.0×10⁸CFU/mL),但在 pH=5~11 范围内,活菌数均能满足标准要求.对比第 2.2 节未调节 pH 值的餐厨垃圾 II 类废水培养 5d 的解磷巨大芽孢杆菌活菌数,发现通过 NaOH 调节至 pH=6 的废水的

活菌数仅为未调节 pH 值废水(pH=5.6)中活菌数的 48.2%,猜测除了 pH 以外,调节溶液 pH 值额外引入的盐分等可能是抑制解磷菌正常生长繁殖的不利因素.

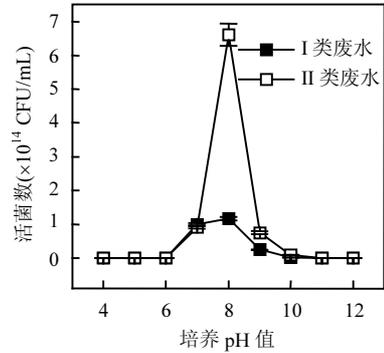


图 5 pH 值对巨大芽孢杆菌培养的影响

Fig.5 The influence of pH on the culture of *Bacillus megaterium*

接种量 2%(*V/V*),摇床转速 80r/min,T=35℃,t= 5d

2.5 NaCl 含量对解磷巨大芽孢杆菌培养的影响

我国餐厨垃圾具有高含水率、高含油以及高含盐率的特点^[30-32],盐分主要是 NaCl,含量高达 0.23~5%^[32-34],而大部分存在于液相(餐厨垃圾废水),因而需要重点探究废水含盐量对巨大芽孢杆菌培养的影响.

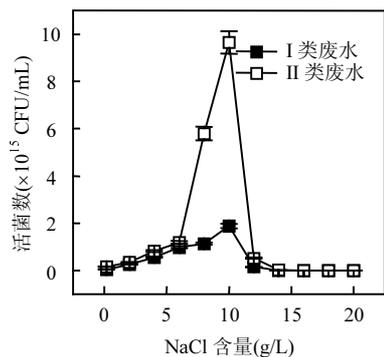


图 6 NaCl 含量对巨大芽孢杆菌培养的影响

Fig.6 The influence of NaCl content on the culture of *Bacillus megaterium*

接种量 2%(*V/V*),摇床转速 80r/min,T=35℃,t= 5d

以两类餐厨垃圾废液为基质,巨大芽孢杆菌活菌数均随着 NaCl 含量的增加呈现先升高后快速降低的趋势(图 6),最利于菌种培养的 NaCl 浓度为

10g/L,这与已有的研究结论一致^[35].当某些地区的餐厨垃圾废水含盐量达到 5000~7000mg/L 时^[8],市售巨大芽孢杆菌的可以正常生长.以《农用微生物菌剂》国家标准^[29]关于菌剂产品的技术指标为标准,巨大芽孢杆菌活菌数达标的 NaCl 浓度不可超过 18g/L.因此,在此情况下,驯化、筛选并分离出高效的耐盐解磷巨大芽孢杆菌是促成后续大规模高密度液态菌肥生产的重要措施.

2.6 液态解磷菌剂的土壤有效磷化效果

按不同稀释倍数施用解磷菌肥的土壤,其总磷含量基本无变化(<5%,数据未展示),而有效磷浓度随着菌肥中巨大芽孢杆菌的活菌数增加而增加(图 7),二者呈现了较好的线性相关性($R^2>0.87$),说明餐厨垃圾废水源解磷菌剂可实现土壤中固化磷的有效磷化,提高土壤的速效磷水平,增加土壤肥力.

餐厨垃圾废水培养的解磷菌剂按照不同稀释比施用至土壤后,10 粒黄豆苗生长 25d 的干重统计如图 8 所示.与不施肥的土壤相比,施加无机复合肥和解磷菌剂均能不同程度促进黄豆苗的生长,黄豆苗干重增加了 95.2%~176.2%,这与土壤缺乏有效磷的理化性质相一致(表 2).根据全国第二次土壤普查对有效磷丰缺的分级标准,添加餐厨垃圾废水培养的巨大芽孢杆菌菌剂后,土壤由极缺有效磷(<3mg/kg)的水平上升至有效磷丰富的一级标准水平(>40mg/kg),土壤有效磷的改善效果显著.

值得注意的是,按照 0.025%~2.5%质量比例添加解磷菌剂的土壤,黄豆苗干重达到按照 5%质量比例施加无机复合肥土壤栽培黄豆苗的 70.7%~84.5%,由此可以大幅减少农用土壤的化肥使用量,有助于土壤结构及功能的恢复和重建.然而,黄豆苗的生长并不随着解磷菌剂施用量增加而增加,按照 0.25%质量比例施用解磷菌剂的土壤其黄豆苗干重最大,说明解磷菌剂存在一个最佳施用量,低于此最佳施用量土壤由于有效磷浓度水平较低不能有效促进作物生长,而高于此施用量,解磷菌数量过高会对土壤原有微生物群落造成冲击,不利于作物生长.因此,餐厨垃圾废水源解磷菌剂施用至不同作物生长土壤时,需要确定最佳施用比例.

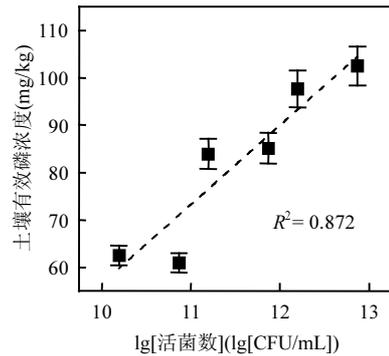


图 7 解磷巨大芽孢杆菌数量与土壤有效磷浓度相关性

Fig.7 The correlation of the number of phosphate-solubilizing *Bacillus megaterium* and the available phosphorus concentration in soil

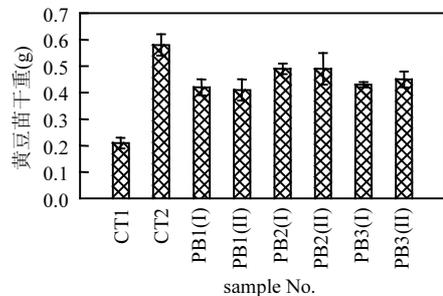


图 8 黄豆在不同施肥条件下的生长情况

Fig.8 The growth status of soybeans under different fertilization conditions

3 结论

3.1 本研究购买的巨大芽孢杆菌细胞为杆状的革兰氏阳性菌,呈链状排列,直径大于 $1\mu\text{m}$,菌落为淡黄色的光滑凸状隆起.该菌株对有机磷的解磷能力为 150mg/L.

3.2 以餐厨垃圾废水为基质,巨大芽孢杆菌经过 3~4d 的调整期即进入对数生长期,第 6~7d 活菌数达到最大(I 类废水 $9.4\times 10^{14}\text{CFU/mL}$,II 类废水 $4.8\times 10^{15}\text{CFU/mL}$),而经过湿热预处理得到的 II 类废水较 I 类废水更适宜用作巨大芽孢杆菌的培养基质,其菌液活菌数是 I 类废水培养活菌数的 5 倍.

3.3 正交试验及方差分析结果表明,pH 值和温度极显著影响巨大芽孢杆菌的生长,而摇床转速和接种量对菌株培养影响不显著,影响显著程度依次为温度 $\text{pH}\sim\text{温度}\gg\text{接种量}\gt\text{摇床转速}$.较优的培养条件为 $\text{pH}=8$ 、 $T=35^\circ\text{C}$ 、转速 80r/min、

接种量 2%(V/V)。

3.4 餐厨垃圾废水中的盐分显著影响巨大芽孢杆菌的生长代谢,活菌数均随着 NaCl 含量的增加先升高后快速降低,最利于菌种培养的 NaCl 浓度为 10g/L,而要使巨大芽孢杆菌活菌数达到《农用微生物菌剂》(GB20287-2006)关于菌剂产品的技术指标,NaCl 浓度不可超过 18g/L。

3.5 巨大芽孢杆菌的活菌数与施肥土壤的有效磷浓度呈现了较好的线性相关性,可实现土壤中固化磷的有效磷化,提高土壤的有效磷水平。

3.6 按照 0.025%~2.5%质量比例添加解磷菌剂的土壤,黄豆苗干重达到按照 5%质量比例施加无机复合肥土壤栽培黄豆苗的 70.7%~84.5%,由此可以大幅减少农用地土壤的化肥使用量。解磷菌剂存在一个最佳施用量(0.25%),在施用时需要根据土壤和作物类型确定最佳施用比例。

参考文献:

- [1] 张 胜,徐武宁,严永红,等.餐厨垃圾废水发酵特征的研究 [J]. 环境污染与防治, 2013,35(12):29-34.
- [2] 王 罕,戴庆武,顾礼炜,等.餐厨垃圾废水综合处理技术进展 [J]. 广东化工, 2013,40(17):155-156.
- [3] Shin S G, Han G, Lee J, et al. Characterization of food waste-recycling wastewater as biogas feedstock [J]. Bioresource Technology, 2015,196:200-208.
- [4] Lee J, Hwang B, Koo T, et al. Temporal variation in methanogen communities of four different full-scale anaerobic digesters treating food waste-recycling wastewater [J]. Bioresource Technology, 2014,168:59-63.
- [5] Shin S G, Han G, Lim J, et al. A comprehensive microbial insight into two-stage anaerobic digestion of food waste-recycling wastewater [J]. Water Research, 2010,44(17):4838-4849.
- [6] 吴阳春.餐厨垃圾废水中温厌氧消化试验研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2011.
- [7] 王 罕,王 晨,田 兴,等.气升环流反应器处理去油脂餐厨垃圾废水 [J]. 工业安全与环保, 2014,40(9):23-26.
- [8] 王 罕,蒋文化,顾礼炜,等.新型 IC 反应器处理餐厨垃圾废水的实验研究 [J]. 工业水处理, 2014,34(9):47-50.
- [9] 何 磊,王志伟,吴志超.餐饮废水 MBR 处理过程中 DOM 的三维荧光光谱分析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(2):225-232.
- [10] 尹艳华,徐文国,赵 毅,等.膜生物反应器处理餐饮废水的试验研究及经济核算 [J]. 工业水处理, 2004,24(1):30-32.
- [11] 祝超伟,毛金炼,何 磊,等.A/O-MBR 处理餐饮废水过程中 DOM 特性解析 [J]. 环境科学与技术, 2012,35(12):224-229.
- [12] 尹艳华,徐复铭,赵 毅,等.膜生物反应器处理餐饮废水的初步研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2005,13(4):358-365.
- [13] 金月祥,沈 杰.膜生物反应器在餐饮废水处理及水回用中的应用 [J]. 城市建筑, 2015,(29):308.
- [14] 白志辉,宿燕明,荆 梦,等.利用餐厨垃圾废水生产木霉微生物肥料 [P]. CN 102040403, 2011.05.04.
- [15] 余 真,张又驰,罗文邃.餐厨垃圾制菌肥对番茄根结线虫病的防效以及对土壤活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6):1217-1224.
- [16] Elliott J M, Mathre D E, Sands D C. Identification and characterization of rhizosphere-competent bacteria of wheat [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1987,53:2793-2799.
- [17] 张倩倩.餐厨垃圾发酵制备肥料专利技术分析 [J]. 北京农业, 2015,(7):65-66.
- [18] 梁绍芬,姜瑞波.解磷微生物肥料的作用和应用 [J]. 土壤肥料, 1994,(2):46-48.
- [19] 戴沈艳,申卫收,贺云举,等.一株高效解磷细菌的筛选及其在红壤性水稻土中的施用效果 [J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(5):678-683.
- [20] 陈 凯,李纪顺,杨合同,等.巨大芽孢杆菌 P1 的解磷效果与发酵条件研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2010,(4):73-76.
- [21] Kildea S, Ransbotyn V, Khan M R, et al. Bacillus megaterium shows potential for the biocontrol of septoria tritici blotch of wheat [J]. Biological. Control., 2008,47:37-45.
- [22] 陆洪省,王亚舒,王厚伟,等.盐碱地中解磷菌的分离鉴定及其解磷能力研究 [J]. 东北农业大学学报, 2014,45(2):77-82.
- [23] Bidondo L F, Bompadre J, Pergola M, et al. Differential interaction between two Glomus intraradices strains and a phosphate solubilizing bacterium in maize rhizosphere [J]. Pedobiologia, 2012,(55):227-232.
- [24] 胡小加,江木兰,张银波.巨大芽孢杆菌在油菜根部定殖和促生作用的研究 [J]. 土壤学报, 2004,41(6):946-948.
- [25] 周军英,林玉锁,徐亦刚,等.巨大芽孢杆菌 LY-4 对土壤中杀虫单农药的降解 [J]. 中国环境科学, 2000,20(6):511-514.
- [26] 孙维娜,孙 梅,陈秋红,等.巨大芽孢杆菌 JD-2 的解磷效果及对土壤有效磷化的研究 [J]. 吉林农业科学, 2012,37(5):38-41.
- [27] GB11893-89 水质总磷的测定 [S].
- [28] 阙国仕,谢建飞,陈红漫.一株高产 Mn-SOD 菌发酵条件的优化 [J]. 中国酿造, 2009,(4):118-120.
- [29] GB20287-2006 农用微生物菌剂 [S].
- [30] 王 权,宫常修,蒋建国,等.NaCl 对餐厨垃圾厌氧发酵产 VFA 浓度及组分的影响 [J]. 中国环境科学, 2014,34(12):3127-3132.
- [31] 王 权,蒋建国,张吴巍,等.油脂对餐厨废弃物单向厌氧定向制酸的影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(5):1436-1441.
- [32] 杨菊平,余 杰,曾祖刚,等.重庆市餐厨垃圾理化性质及处理处置方法的研究 [J]. 环境卫生工程, 2011,19(6):60-62.
- [33] 夏 旻,毕珠洁,张瑞娜,等.上海市餐厨垃圾理化特性及资源化预处理对策研究 [J]. 环境卫生工程, 2013,21(6):1-3.
- [34] 胡新军,张 敏,余俊峰,等.中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策 [J]. 生态学报, 2012,32(14):4575-4584.
- [35] 万 璐,康丽华,廖宝文,等.红树林根际解磷菌分离、培养及解磷能力的研究 [J]. 林业科学研究, 2004,17(1):89-94.

作者简介: 郭新愿(1976-),女,河南原阳人,北京工业大学博士研究生,主要研究方向为废水处理及资源化.发表论文 5 篇。