

# 反硝化聚磷菌吸磷能力和生长特性研究

樊晓梅

(东北大学建筑设计院有限公司,辽宁 沈阳 110004)

**摘要** 目的 研究反硝化聚磷菌在同一反应条件下的吸磷能力和生长特性,为污水脱氮除磷微生物学的研究提供理论依据. 方法 通过反硝化聚磷菌的吸磷试验,确定各菌株的含磷量及吸磷速率;通过拮抗试验构建复合菌群,采用浊度法绘制各菌群的生长曲线,进一步研究微生物的种群特性及对环境的适应能力. 结果 韦荣氏菌属在缺氧培养 3 h 时,磷质量浓度出现最大降幅,出水  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 质量浓度均低于 2.00 mg/L. 菌株 F8 适应新环境的能力最强. 对数期时,菌株 F3、F9、F13 的生长速率最小. 菌株 F5 的稳定期持续时间比较短,处于 144 ~ 168 h;F11 持续时间最长,处于 144 ~ 216 h. 菌株 F16 对数期最短,最先进入稳定期,且稳定期持续时间最长. 各种复配菌株处于稳定期时菌体数量从小到大依次为 F9、F8、F3、F10、F7、F2、F4、F14、F16、F6、F11、F1、F5、F12、F13、F15. 结论 反硝化聚磷菌单菌吸磷速率与其菌株整体吸磷量大小无关,复合菌株较强的适应能力使其调整期比任何一株单菌的时间都短.

**关键词** 反硝化聚磷菌;吸磷能力;生长曲线;单菌吸磷速率

中图分类号 X703

文献标志码 A

## Research on the Phosphorus Absorption Ability and Growth Characteristics of Denitrifying Phosphorus-Accumulating Organisms

FAN Xiaomei

(Architectural Design Institute of Northeastern University Co. Ltd, Shenyang, China, 110004)

**Abstract:** The phosphorus absorption ability and growth characteristics of denitrifying phosphorus-accumulating organisms were researched under unified reacting conditions. The research provided the theoretical basis for the study of the microbiology of nitrogen and phosphorus removal in wastewater. We got the phosphorus content of different strains and phosphorus uptakerate by the phosphorus absorption test of denitrifying phosphorus removing bacteria; The growth curve of each strain was obtained by the turbidity method and the compound bacteria were constructed by antagonistic test so that which will make it easier for us to have further study on the population characteristics of microorganisms and their adaptability to the environment. Bacteria Vei. showed

收稿日期:2016-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51108277)

作者简介:樊晓梅(1973—),女,博士研究生,主要从事污水深度处理与再生利用研究.

the biggest decreasing amplitude at the time of 3h in anoxic condition, the water quality of  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  concentrations were lower than 2.00 mg/L. The strains F8 has the best ability to adapt to the new environment, the strain F3, F9 and F13 had the minimal growth rate in logarithmic phase. Plateau duration of strain F5 was shorter, which was between 144 – 168 h, while plateau duration of strain F5 was longer, which was between 144 – 216 h. Strain F16 had the shortest logarithmic time, and it was the first strains coming into the plateau, and it kept the longest duration. The ascending order of the number of the compounded organisms in plateau was F9, F8, F3, F10, F7, F2, F4, F14, F16, F6, F11, F1, F5, F12, F13 and F15. Phosphorus absorption rate of single DPAO had no relation to the overall phosphorus uptake, and strong adaptability of compounded strains made its shorter adjustment time than any single strain.

**Key words:** denitrifying phosphorus-accumulating organisms (DPAOs); phosphorus absorption ability; growth curve; phosphorus absorption rate of single bacteria

反硝化除磷工艺可以节省碳源和曝气量及实现污泥减量. 在厌氧条件下, 反硝化聚磷菌通过分解胞内多酸盐释放正磷酸获得能量来合成反硝化聚磷菌的胞内物质聚羟基烷酸 (Polyhydroxyalkanoates, PHA); 在缺氧条件下, 反硝化聚磷菌利用 PHA 作为电子供体, 以硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体同步除磷脱氮<sup>[1-4]</sup>. 由于胞内 PHA 既作为反硝化的碳源, 又作为反硝化聚磷菌过量吸磷的能源, 实现了“一碳两用”的目的<sup>[5-12]</sup>.

一些专家学者通过试验对反硝化除磷系统进行研究, 分析反硝化除磷产电系统的影响因素, 取得了一定的成果<sup>[13-16]</sup>. 研究表明, pH 值是反硝化除磷产电工艺中的一个关键性因素, 细胞膜电荷的大小随 pH 值的改变而变化, 同时影响酶的活性, 阻碍营养物质的利用和吸收, 微生物种群结构也会受到影响; 影响该系统的因素还有碳源, 碳源的易降解和可利用程度, 直接关系到产电菌的催化作用和反硝化聚磷菌 (DPAOs) 的释磷速率以及聚- $\beta$ -羟丁酸 (Polyhydroxybutyrate, PHB) 的合成数量和种类. 通常情况下, 碳源浓度含量越高, 随之释放的  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  质量浓度就越大, 产电菌产生的电子就越多, 当碳源浓度含量较低时, 微生物降解有机物能力下降, 产电效率较低, 而且不同碳源种类和碳氮比对反硝化除磷的效果都有所影响; 还有关于温度、溶解氧质量浓度及 HRT 等的探究试

验, 但是微生物学方面的研究是必不可少的. 基于此, 笔者进行了反硝化聚磷菌的微生物试验研究, 采用浊度法绘制各菌株的生长曲线, 并通过拮抗试验构建复合菌群, 从而进一步研究微生物的种群特性及对环境的适应能力, 为污水脱氮除磷的深入研究提供基础数据.

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 菌株

从稳定运行的双泥生物膜亚硝化反硝化除磷装置的缺氧池中分离鉴定出 N2 (韦荣氏菌属)、N4 (爱德华氏菌属)、N6 (奈瑟氏菌属)、N7 (布兰汉氏球菌属)、B5 (葡萄球菌属)、C5 (副球菌属)、D4 (泛菌属)、FA5 (克雷伯氏菌属)、FA6 (芽孢杆菌属)、FB2 (肠杆菌属) 和 FB4 (莫拉氏菌属), 共 11 株菌<sup>[17]</sup>.

#### 1.1.2 培养基与试剂

牛肉膏蛋白胨固体培养基: 牛肉膏 3 g, 蛋白胨 10 g, NaCl 5 g, 蒸馏水 1 000 mL, 琼脂 20 g, pH 值 7.2<sup>[18]</sup>.

牛肉膏蛋白胨液体培养基: 1 L 蒸馏水中加入蛋白胨 10 g, 牛肉膏 3 g 和 NaCl 5 g, pH 值 7.2<sup>[19]</sup>.

吸释磷试验缺磷培养液: 1L 蒸馏水中加入 3.32 g  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , 22.98 mg  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 152.76 mg  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 81.12 mg  $\text{MgSO}_4$ .

7H<sub>2</sub>O,17.83 mg K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,11.00 mg CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O,7 g HEPES 缓冲溶剂和 2 mL 微量元素,pH 值 7.

微量元素构成:1L 蒸馏水加入 50 g EDTA,5 g FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,1.6 g CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O,5 g MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O,1.1 g (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O,5 mg H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>,10 mg KI 和 50mg CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O<sup>[20]</sup>.

吸释磷试验富磷培养液:1L 蒸馏水中加入 0.2 g NaNO<sub>2</sub>,35.11 mg K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O,305.52mg NH<sub>4</sub>Cl,91.26 mg MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,25.68 mg CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O,8.5g PIPES 缓冲溶剂和 2 mL 微量元素,pH 值 6.8.

1.2 测定方法

1.2.1 测试项目与方法

COD:重铬酸钾消解法;磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P):钼锑抗分光光度法;氨氮(NO<sub>4</sub><sup>+</sup>-N):纳氏试剂法;亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N):N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N):紫外分光光度法;溶解氧:溶解氧测试仪;生物相:显微镜.

1.2.2 DPAOs 吸磷能力的测定

(1)取 2 mL 各种菌悬液接种于装有 100 mL 缺磷培养液的三角瓶中,于 30 ℃ 摇床中震荡培养 24 h,5 000 r/min 离心,弃去上清液,用无菌水洗涤后再离心,重复 2 次.将菌体接种于富磷培养液中,在 30 ℃ 摇床中缺氧培养 24 h.将培养后的菌液离心,收集菌体,用无菌水洗涤后再离心,重复三次,得湿菌体,105 ℃ 条件下烘干 2 h,测菌体干重.

(2)按照以上的方法,将湿菌体溶解于无菌水中,用过硫酸钾溶液消解,测菌体磷酸盐含量<sup>[20]</sup>.

1.2.3 生长曲线的测定

(1)取 2mL 各菌种的活化菌液,在无菌条件下接种于装有 200 mL 牛肉膏蛋白栋培养液的 250 mL 三角瓶中,摇匀.

(2)接种以后的三角瓶在 30 ℃、140 r/min 恒温摇床中缺氧培养,取样时间分

别为 0 h、3 h、6 h、24 h、48 h、72 h、96 h、120 h、144 h 和 168 h.为了避免不必要的干扰影响试验结果,取完样后立即测定.

(3)细菌生长量的测定:以蒸馏水作为空白对照,用可见分光光度计在 600 nm 波长下测定待测菌液的 OD 值(光密度),为了减少试验误差,每个数据测定三个平行样,可得到各菌株的生长曲线.

1.2.4 复合菌群的构建

将筛选到的 11 株聚磷菌株,除去相互之间有拮抗作用的组合,任意挑选 5 株相互搭配,按照 1:1:1:1:1 的比例构建复合菌群.复合菌群的编号分别为 F1、F2、F3、F4、F5、F6、F7、F8、F9、F10、F11、F12、F13、F14、F15、F16,其构成如表 1 所示.

表 1 复合菌群的构成

| Table 1 The composition of organisms |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 编号                                   | 构成                         |
| F1                                   | B5 + FB2 + FB4 + FA6 + FA5 |
| F2                                   | B5 + FB2 + FB4 + FA6 + D4  |
| F3                                   | FB4 + FA5 + N6 + FA6 + D4  |
| F4                                   | FB4 + FA5 + FB2 + FA6 + D4 |
| F5                                   | FB4 + FA5 + FB2 + FA6 + N6 |
| F6                                   | D4 + FA5 + FB2 + B5 + N6   |
| F7                                   | D4 + FA5 + FB2 + B5 + N6   |
| F8                                   | D4 + FA5 + FB4 + FA6 + N4  |
| F9                                   | D4 + FA5 + FB4 + FA6 + B5  |
| F10                                  | D4 + FA5 + B5 + FA6 + N4   |
| F11                                  | B5 + FA5 + FB4 + FA6 + N4  |
| F12                                  | FB4 + FB2 + FA6 + B5 + N2  |
| F13                                  | FB2 + FA5 + FA6 + N2 + B5  |
| F14                                  | FA5 + FB2 + FB4 + D4 + N6  |
| F15                                  | FB2 + FA5 + FA6 + N4 + B5  |
| F16                                  | D4 + N4 + FB2 + FA6 + FA5  |

2 试验结果与讨论

2.1 反硝化聚磷菌吸磷能力的测定

2.1.1 反硝化聚磷菌的含磷量

一般菌体在测量质量时,菌体内含磷量只占菌体总质量的 2%<sup>[6]</sup>,而 DPAOs 会通过储存聚合磷酸盐的方式来完成自身的增殖,所以在测量质量时,菌体内含磷量可达菌体总量的 6% 左右,个别可达 8% ~ 10%<sup>[7-8]</sup>.本试验反硝化聚磷菌对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的吸收量如表 2 所示,所有菌株的含磷率均在 10% 左

右,并且 N2、C5、N4、FA6 四株菌体的含磷率 10.10%、10.98%,显然,这几株菌体的吸磷能力高于其他菌株.

表 2 DPAOs 的含磷量

Table 2 Phosphorus concentration of DPAOs

| 菌株编号        | 菌体质量/mg | 菌体含磷量/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 菌体含磷率/% |
|-------------|---------|-----------------------------|---------|
| N2(韦荣氏菌属)   | 9.970 3 | 1.031 0                     | 10.34   |
| FB2(肠杆菌属)   | 9.131 1 | 0.897 0                     | 9.82    |
| C5(副球菌属)    | 8.970 9 | 0.922 9                     | 10.29   |
| N4(爱德华氏菌属)  | 8.813 7 | 0.890 3                     | 10.10   |
| N6(奈瑟氏菌属)   | 8.728 1 | 0.799 3                     | 9.16    |
| FA6(芽孢杆菌)   | 3.629 5 | 0.398 7                     | 10.98   |
| FB4(莫拉氏菌属)  | 5.193 2 | 0.494 7                     | 9.53    |
| N7(布兰汉氏球菌属) | 5.127 9 | 0.491 5                     | 9.58    |
| D4(泛菌属)     | 4.727 6 | 0.452 5                     | 9.57    |
| B5(葡萄球菌属)   | 2.037 0 | 0.187 9                     | 9.22    |
| FA5(克雷伯氏菌属) | 1.977 9 | 0.183 3                     | 9.27    |

2.1.2 反硝化聚磷菌的吸磷速率

不同菌株的吸磷速率如图 1 所示.11 株菌的起始磷质量浓度差别不大,最低磷质量浓度为 4.231 ~ 7.110 mg/L,均表现出一定的吸磷速率.但是各菌株的最大吸磷速率差

别很大,FA6 最大,为 5.30 mg/(L·h),B5、D4 次之并且明显高于其他菌株.由图 1 可以得出,反硝化聚磷菌单菌吸磷速率大小与其整体吸磷量大小关系不大.

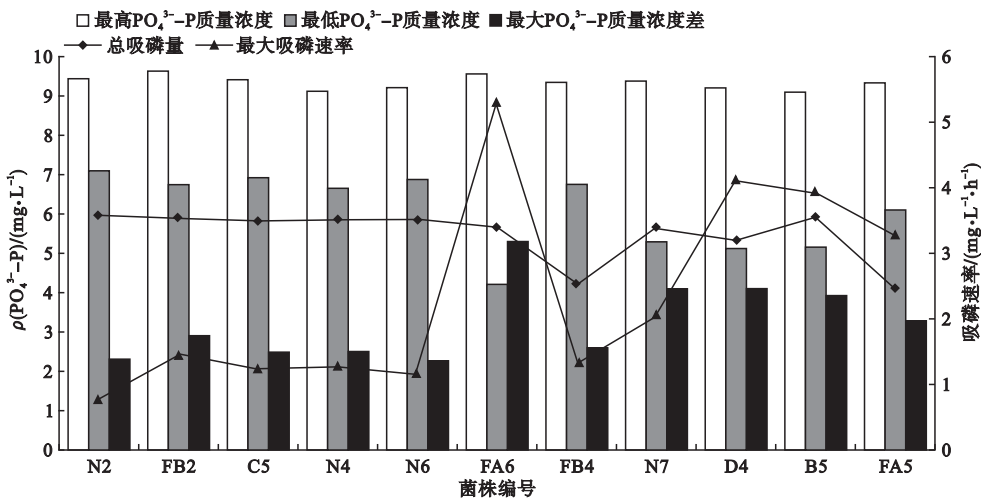


图 1 不同菌株吸磷速率对比

Fig. 1 The comparison of phosphorus absorption rate of different strains

2.2 反硝化聚磷菌的生长曲线

绘制微生物生长曲线常见的做法是将菌种转接于适宜其生长的培养基上,使其能在一段时间内生长繁殖,然后按时取样测定菌

悬液吸光度,根据测量结果绘制菌体质量浓度随时间生长变化的曲线,即为对应微生物的生长曲线.微生物的生长一般分为调整期、对数期、稳定期、衰亡期四个阶段.出现的结

果一般是菌的数量从少变多,当生长到最高峰时又慢慢减少,甚至死亡的这样的一种规律.调整期是指菌体适应新环境所需要的时间,此时菌体会吸收周围的营养物质,个体增大,但数量基本上保持不变;对数期是指菌体适应新环境,并利用培养基内充足的底物快速生长繁殖的过程;一段时间以后,培养基内的底物被消耗,加上之前菌体生长繁殖产生的有毒代谢物会影响菌株的生长速率,使微生物生长进入稳定期,此时菌体相对于对数期的生长有下降的趋势.处于稳定期的微生

物代谢活力低于其对数生长期,但相比较而言代谢活力还不错,而且对有机物也有一定的去除效果,此时反硝化聚磷菌的最大特点是可以体内贮存大量 PHB,同时强化生物吸附能力,增强菌体之间的聚合能力,达到良好的污水净化效果;稳定期过后,培养基内底物开始匮乏,不足以维持菌体的正常生长代谢,微生物生长开始进入衰亡期,这个时候的菌体数量会有所下降,有些菌也会死亡.

对构建好的菌群进行菌株生长曲线的测定,试验结果如图 2 ~ 图 4 所示.

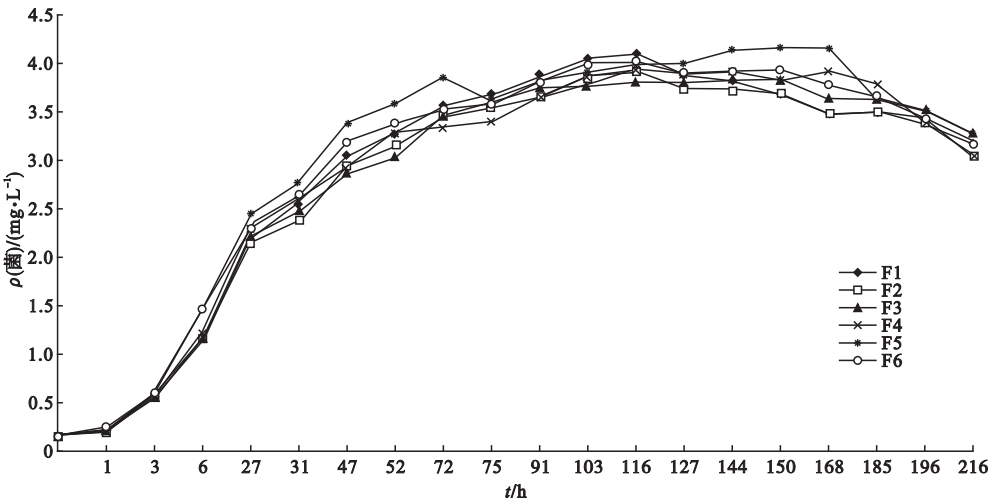


图 2 菌株 F1、F2、F3、F4、F5、F6 的生长曲线

Fig. 2 The growth curves of strains F1, F2, F3, F4, F5 and F6

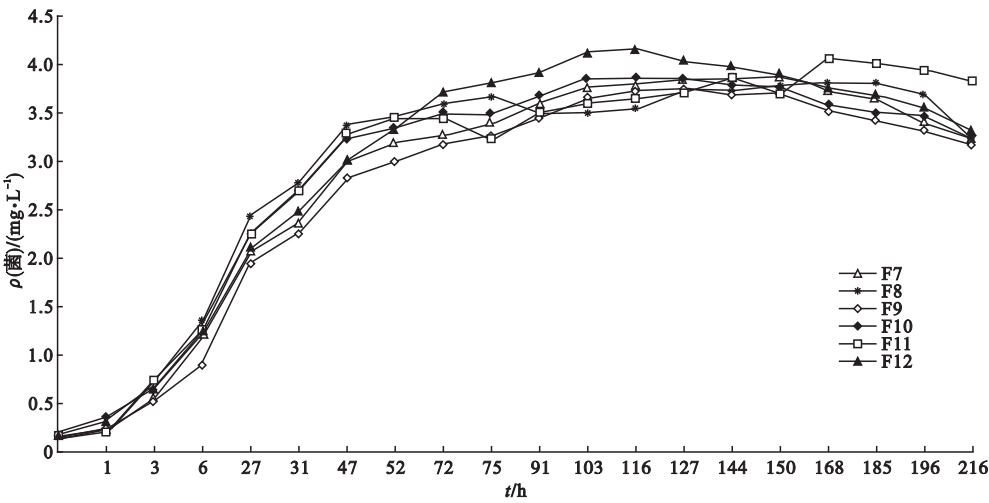


图 3 菌株 F7、F8、F9、F10、F11、F12 的生长曲线

Fig. 3 The growth curves of strains F7, F8, F9, F10, F11 and F12



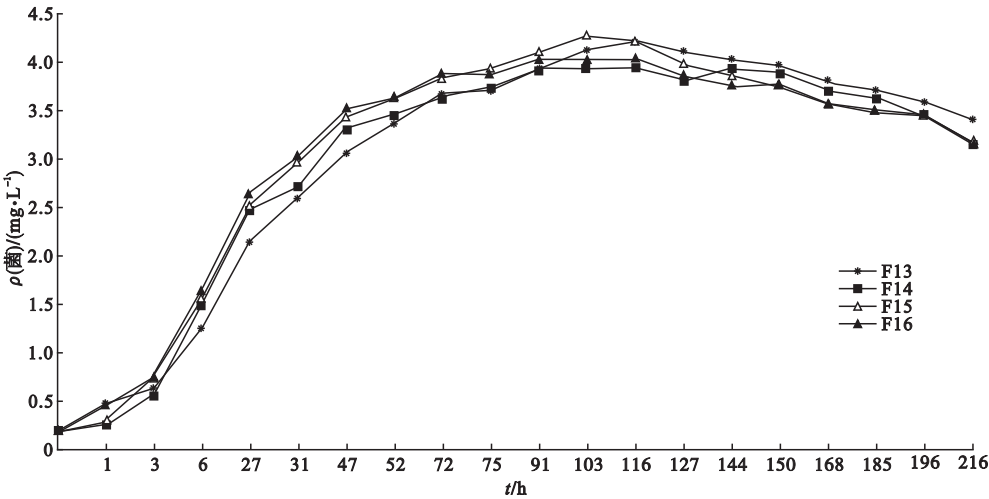


图 4 菌株 F13、F14、F15、F16 的生长曲线

Fig. 4 The growth curves of strains F13, F14, F15 and F16

从图 2 ~ 图 4 可以看出, 16 株菌的生长曲线都有较明显的调整期、对数期、稳定期和衰亡期. 将 16 株菌分别接种于培养基后, 各株菌的调整时间均较短, 几乎都处于 0 ~ 3 h, 这表明复合菌株的适应能力较强, 且菌株接种时都处于对数期, 将几株菌复合后它们之间有促进作用, 有利于对周围环境的适应, 很快进入生长对数期. 相比于其他菌株, F8 具有更快地适应新环境的能力, F10、F11、F15、F16 次之. 在调整期菌体增长量虽不多, 但也有所增长, 因为菌株刚接种到新培养基中, 不能在短时间内适应新环境, 必须通过一定的时间合成分解底物的酶. 对数期的菌种因为营养丰富呈几何级数增长, 几株菌的对数期不完全相同, 相较于其他菌株, 菌株 F3、F9、F13 的生长曲线的对数期的斜率最小, 说明对数期时, 菌株 F3、F9、F13 的生长速率最小. 3 h 以后各株菌相继进入对数期, 且对数期稳定在 110 h 左右. F5、F11 的对数期时间最长, 进入稳定期都比较晚, 且这两株菌整体的生长曲线起伏较其他几种菌大.

从图 2 ~ 图 4 可知, 对数期处于 3 ~ 144 h, 且在此期间 F5 菌株于 3 ~ 72 h 增长速率是 16 株菌中最快的, F11 菌株于 3 ~ 52 h 增长迅速, 于 52 ~ 150 h 缓慢增长, 两株

菌在此期间为稳定期, 此时两株菌有一个共性, 即都出现一个比较大的菌悬液浓度值, 菌株 F11 在 168 h 时到达最大值点. 从稳定期持续时间长短来看, F5 持续时间比较短, 处于 144 ~ 168 h, F11 持续时间最长, 处于 144 ~ 216 h. 从图中可以看出, 两株菌在稳定期出现了负增长现象, 可能是由于取样时没有充分摇匀, 取到的是悬浮菌体较少的上清液, 也可能是测数过程中的偶然因素造成, 经再次试验验证菌体的增长速率是正的, 说明在试验过程中会有很多偶然因素会干扰我们的试验结果, 这就要求我们在试验过程中必须认真严谨. F1、F13、F15 菌株曲线整体趋势相近, 对数期处于 6 ~ 75 h, 75 h 以后进入稳定期, 期间有缓慢增长的趋势, 且在 105 h 和 116 h 时有个最高值点. 菌株 F16 对数期最短, 最先进入稳定期, 且稳定期持续时间最长, 在 72 ~ 196 h, 稳定期内增长幅度很小. 16 株菌中 F8 进入稳定期的时间与 F16 相同, 稳定期持续时间也相同, 但中间有个别负增长点, 整体来看稳定期菌悬液浓度最稳定. 菌株 F14 在 91 h 时进入稳定期, 此前对数期内 3 ~ 27 h 增长速率比较快, 27 ~ 91 h 速率增长缓慢, 150 h 以后开始缓慢下降. 菌株 F7、F10 曲线转增提趋势接近, 稳定期短. 菌株 F9 曲

线一直缓慢在增长,于 103 ~ 127 h 达到稳定期,稳定期最短,稳定期结束后开始缓慢下降.菌株 F12 稳定期短,且稳定期结束后衰亡期内曲线缓慢下降.菌株 F6 在对数期内曲线呈缓慢增长趋势.

稳定期菌体可利用的营养物质较少,不能为菌体的继续生长提供充足的营养,因此限制了菌体进一步增殖,使菌体数量维持在一个相对稳定的状态.从图 2 ~ 图 4 可以看出,各种菌处于稳定期时菌体数量从小到大依次为 F9、F8、F3、F10、F7、F2、F4、F14、F16、F6、F11、F1、F5、F12、F13、F15.衰亡期是菌体处于营养物质完全耗尽的环境下,不能从外界环境中摄取营养物质,只能进行内源性呼吸,消耗菌体中储存的营养物质来维持活性.处于此期间的活菌体量不但没有增长反而会因菌体的大量死亡而下降.

此生长曲线因为测定的是菌悬液中活菌和死菌的总悬浮浓度,因此生长曲线不能明显体现出衰亡期活菌的下降趋势,而是维持在稳定期时的  $OD$  值.在稳定期内有少量菌体开始死亡,死亡的菌体在三角瓶中培养时间较长就会引起菌的尸体上浮至培养液表面,此现象在三角瓶中能很明显的观察到.而取样时虽然混合了菌体,但是上浮的菌体尸体并不能混合到菌悬液中,因此测得的  $OD$  值基本是由活菌引起的,这与理论上在衰亡期活菌数量会不断减少相符.

### 3 结 论

(1)菌株 N2(韦荣氏菌属)在缺氧培养 3 h 时,磷质量浓度出现最大降幅,出水  $PO_4^{3-}-P$  质量浓度均低于 2.00 mg/L.反硝化聚磷菌单菌吸磷速率与其菌株整体吸磷量大小无关.

(2)复合菌株较强的适应能力使其调整期比任何一株单菌的时间都短.菌株 F8 适应新环境的能力最强.对数期时,菌株 F3、F9、F13 的生长速率最小.菌株 F5 的稳定期持续

时间比较短,处于 144 ~ 168 h, F11 持续时间最长,处于 144 ~ 216 h.菌株 F16 对数期最短,最先进入稳定期,且稳定期持续时间最长.各种复配菌株处于稳定期时菌体数量从小到大依次为 F9、F8、F3、F10、F7、F2、F4、F14、F16、F6、F11、F1、F5、F12、F13、F15.

### 参考文献

- [1] 陈舒.聚磷菌的筛选鉴定及其脱氮除磷特性研究[D].青岛:青岛大学,2012.  
(CHEN Shu. Screening and identification of phosphorus accumulating organisms and their characteristics of nitrogen and phosphorus removal [D]. Qingdao: Qingdao University, 2012.)
- [2] 连丽丽.聚磷菌的筛选及其对污水的除磷特性研究[D].大连:辽宁师范大学,2009.  
(LIAN Lili. Screening of phosphate-accumulating organisms and study on removing phosphate characteristic in sewage water [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2009.)
- [3] 周康群,刘晖,孙彦富,等.聚磷菌的 SBR 反应器中微生物种群与浓度变化[J].中南大学学报,2008,39(4):705-711.  
(ZHOU Kangqun, LIU Hui, SUN Yanfu, et al. Change of microorganism amount and species in SBR reactor enriching denitrifying phosphate bacteria[J]. Journal of central south university (science and technology), 2008, 39(4):705-711.)
- [4] 李观元.以丙酸为碳源的反硝化除磷工艺运行特性及影响因素研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
(LI Guanyuan. Operation characteristics and affecting factors of denitrifying phosphatation process fed with propionic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [5] LANHAM A B, MOITA R, LEMOS P C. Long-term operation of a reactor enriched in Accumulibacter clade I DPAOs: performance with nitrate, nitrite and oxygen[J]. Water science and technology, 2011, 63(2):352-359.
- [6] ZHANG T, LIU Y, FANG H H P. Effect of pH change on the performance and microbial community of enhanced biological phosphate removal process[J]. Biotechnology and bioengineering, 2005, 92(2):173-182.
- [7] OEHMEN A, VIVES M T, LU H, et al. The effect of pH on the competition between poly-

- phosphate-accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms [J]. Water research, 2005, 39(15): 3727 – 3737.
- [8] ILIAS Z, SPYRIDON N, PARASKEVI M, et al. Molecular characterization of denitrifying bacteria isolated from the anoxic reactor of a modified DEPHANOX plant performing enhanced biological phosphorus removal[J]. Water environment research, 2012, 84: 1 – 10.
- [9] ANNALISA O, NEHREEN M, ANDREAS S, et al. Process optimization by decoupled control of key microbial populations: Distribution of activity and abundance of polyphosphate-accumulating organisms and nitrifying populations in a full-scale IFAS-EBPR plant[J]. Water research, 2011, 45: 3845 – 3854.
- [10] LIN H Z, YU J L, LING F Q, et al. Study on environment materials with separation and identification of denitrifying phosphorus-removing bacteria[J]. Advanced materials research, 2013, 676: 114 – 118.
- [11] VAIPOULOU E, AIVASIDIS A. A modified UCT method for biological nutrient removal [J]. Chemosphere, 2008, 72(7): 1062 – 1068.
- [12] YAGCI N, ARTAN N, COKGOR E U, et al. Metabolic model for acetate uptake by a mixed culture of phosphate and glycogen-accumulating organisms under anaerobic conditions[J]. Biotechnology and bioengineering, 2003, 84(3): 359 – 373.
- [13] PENG Y Z, WANG Y Y, MASOU O, et al. Denitrifying phosphorus removal in a continuously-flow A2N two-sludge process[J]. Journal of environmental science and health. part a: toxic hazardous substances and environmental engineering, 2004, 39(3): 703 – 715.
- [14] LI Y, LIU H T, REN J. Study on the isolation screening and characteristic identification of denitrifying phosphorus removing bacteria in sequencing batch biofilm reactor[J]. International conference on biomedical engineering and biotechnology, 2012, 38(1): 547 – 550.
- [15] MU D Y. Study on the cultivation and enrichment of denitrifying phosphorus accumulating organism in different patterns [J]. Advanced materials research, 2014, 830: 481 – 484.
- [16] 张立成, 刘强, 刘晓伟, 等. 后曝气池 HRT 对双泥生物膜亚硝化反硝化除磷工艺的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(4): 726 – 732.
- (ZHANG Licheng, LIU Qiang, LIU Xiaowei, et al. Effect of re-aerobic tank hydraulic retention time(HRT) on nitrosation and denitrifying phosphorus removal in two-sludge bio-film process[J]. Journal of Shenyang jianzhu university( natural science), 2013, 29(4): 726 – 732. )
- [17] 杨志愿, 邱业先, 李孝坤, 等. 三株反硝化聚磷菌的筛选及其生理生化特性的鉴定[J]. 环境科技, 2009, 22(3): 36 – 40.
- (YANG Zhiyuan, QIU Yexian, LI Xiaokun, et al. Screening of three denitrifying polyphosphate-accumulation organisms and their biological characteristics [J]. Environmental science and technology, 2009, 22(3): 36 – 40. )
- [18] 代文臣, 张捍民, 肖景霓, 等. 序批式膜生物反应器中聚磷菌的富集[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 517 – 521.
- (DAI Wenchen, ZHANG Hanmin, XIAO Jingni, et al. Enrichment of denitrifying phosphate accumulating organisms in sequencing batch membrane bioreactors [J]. Environmental science, 2007, 28(3): 517 – 521. )
- [19] 袁昊, 吕锡武, 徐微. 双污泥反硝化除磷工艺处理生活污水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(17): 28 – 30.
- (YUAN Hao, Lü Xiwu, XU Wei. Pilot-scale study on two-sludge denitrifying phosphorus removal process for treatment of domestic sewage [J]. China water & wastewater, 2009, 25(17): 28 – 30. )
- [20] 许彦娟, 张利平. 反硝化聚磷菌的分离筛选及鉴定[J]. 河北农业大学学报, 2008, 31(3): 60 – 63.
- (XU Yanjuan, ZHANG Liping. Isolation screening and identification of denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. Journal of agricultural university of Hebei, 2008, 31(3): 60 – 63. )