

方振东,龙向宇,唐然,等. 2011. 胞外聚合物结合磷效能的研究[J]. 环境科学学报,31(11):2374-2379

Fang Z D, Long X Y, Tang R, et al. 2011. The phosphorus-incorporating property of extracellular polymer substances [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(11):2374-2379

胞外聚合物结合磷效能的研究

方振东¹, 龙向宇^{1,2,*}, 唐然¹, 周从直¹, 冯裕钊¹, 王恕¹

1. 后勤工程学院 营房管理与环境工程系, 重庆 401311

2. 后勤工程学院化学工程与技术博士后流动站, 重庆 401311

收稿日期: 2011-01-23

修回日期: 2011-04-12

录用日期: 2011-04-29

摘要:以实验 SBR 反应器的活性污泥为研究对象,探讨了超声波-树脂法提取 EPS 的方法与程序;以 5 种不同来源的活性污泥为研究对象,考察了 EPS 结合磷的效能. 结果表明,超声波-树脂法分离 EPS 和细菌细胞的较优程序为:采用 21 kHz、40 W 超声波作用 60 mL 污泥 2 min (VSS 约为 8000 mg·L⁻¹);然后,投加 80 g·g⁻¹ (以单位质量 VSS 投加的树脂质量计)的阳离子交换树脂,于 550 r·min⁻¹ 下搅拌 45 min. 对于 5 种不同来源的活性污泥,超声波-树脂法提取得到的 EPS 聚合物总含量,占污泥聚合物总含量的 14%~28%;EPS 结合的 TP 含量占污泥 TP 含量的 34%~57%,结合的无机磷含量占污泥 TP 含量的 15%~31%. 5 种污泥的 EPS 结合磷的能力分别是其自身细菌细胞(分离 EPS 后的细菌细胞)的 2.6、2.9、2.8、2.0 与 1.4 倍,说明 EPS 是生物絮体中的磷贮存库.

关键词:胞外聚合物;磷;超声波;阳离子交换树脂

文章编号: 0253-2468(2011)11-2374-06

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

The phosphorus-incorporating property of extracellular polymer substances

FANG Zhendong¹, LONG Xiangyu^{1,2,*}, TANG Ran¹, ZHOU Congzhi¹, FENG Yuzhao¹, WANG Shu¹

1. Department of Barracks Management & Environmental Engineering, Logistics Engineering University of PLA, Chongqing 401311

2. Postdoctor Mobile Station of Chemical Engineering and Technology, Logistics Engineering University of PLA, Chongqing 401311

Received 23 January 2011;

received in revised form 12 April 2011;

accepted 29 April 2011

Abstract: By adopting the activated sludge from laboratory sequencing batch reactor (SBR), this study discussed the extracted method with ultrasonic and cation resin of extracellular polymer substances (EPS). In addition, the phosphorus-incorporating property of EPS was investigated with the five kinds of activated sludge from different reactors. The optimum separation process of EPS from sludge was obtained from the experiments. At first, 60 mL sludge sample with VSS about 8000 mg·L⁻¹ was processed for 2 min with 21 kHz 40 W ultrasonic. Subsequently, cation exchange resin with the adding amount of 80 g·g⁻¹ for per gram VSS was added to the treated sludge sample, and then was blended for 45 min with 550 r·min⁻¹. For the five kinds of activated sludge from different reactors, the total contents of EPS extracted with the optimum separation process were 14%~28% of the sludge total polymer content. The contents of total phosphorus-incorporating of EPS were 34%~57% of the sludge total phosphorus, and the inorganic phosphorus contents of EPS were 15%~31% of the sludge total phosphorus. The phosphorus-incorporating abilities of EPS from five kinds of sludge were 2.6, 2.9, 2.8, 2.0 and 1.4 times those of the bacteria, indicating that EPS was the phosphorus storage of biological floc.

Keywords: extracellular polymer substances; phosphorus; ultrasonic; cation exchange resin

1 引言 (Introduction)

生物除磷是控制水体富营养化的重要途径,已被广泛地应用于废水或污水中磷的去除 (Oehmen *et al.*, 2007,). 目前,大部分研究者认为,生物强化

除磷 (EBPR) 通过厌氧/好氧条件的交替运行富集聚磷菌 (PAOs),并借助细菌细胞中的聚磷、聚羟基脂肪酸 (PHA) 和糖原三者之间的代谢循环,有效去除废水中的磷 (De - Bashan *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2010). 事实上,活性污泥是由细菌细胞、胞外

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2008ZX07315-003); 重庆市自然科学基金资助项目 (No. CSTC2009BB7175)

Supported by the National Water Pollution Control and Management Technology Major Program of China (No. 2008ZX07315-003) and the Natural Science Foundation of Chongqing Municipality (No. CSTC2009BB7175)

作者简介: 方振东 (1962—), 男, 教授 (博士), E-mail: fzdhg@tom.com; * **通讯作者 (责任作者)**, E-mail: 2002longxy@sina.com

Biography: FANG Zhendong (1962—), male, professor (Ph. D.), E-mail: fzdhg@tom.com; * **Corresponding author**, E-mail: 2002longxy@sina.com

聚合物(extracellular polymer substances,简称 EPS)、无机颗粒所组成的复杂聚集体(Urbain *et al.*, 1993).近年来,有研究者认为,EPS在活性污泥中充当磷贮存库的作用,生物除磷过程可能与EPS对磷的结合作用有密切联系(Cloete *et al.*, 2001).Cloete采用X射线扫描电镜与能谱仪,检测到污水处理厂活性污泥外层清晰可辨的EPS中含有27%~30%的磷,并指出细菌细胞的表面及菌胶团的细菌细胞之间紧密地结合了难以分辨的EPS(Cloete *et al.*, 2001).周健采用阳离子交换树脂法提取活性污泥中的EPS,研究认为活性污泥中EPS的磷含量表现出厌氧减少、好氧增加的变化过程,污泥中有15%~18%的磷聚集在EPS中(Zhou *et al.*, 2008).Li等也采用阳离子交换树脂法提取活性污泥中的EPS,考察了温度对生物强化除磷过程中胞内吸磷和EPS胞外除磷的影响,认为低温有利于EPS除磷,5.0℃下EPS的除磷量占总除磷量的13%(Li *et al.*, 2010).上述研究中,EPS结合磷含量的差异不仅与活性污泥样品的来源不同有关,而且与各研究者采用的研究方法不同有密切的联系.

与阳离子交换树脂法相比,超声波-树脂法具有反应时间短、EPS提取量大的优点,不仅能提取污泥絮体中疏松结合的EPS,而且能提取紧密结合的EPS(Long *et al.*, 2008).本文采用超声波-树脂法提取活性污泥的EPS,探讨了EPS提取量与其TP含量的关系;并且以5种不同来源的活性污泥为研究对象,考察不同来源活性污泥中EPS所结合磷的形态和含量的差异,分析了EPS结合磷的效能,进一步明确了EPS结合磷的能力.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 仪器与试剂

EBA21型离心机、TGL-16G型高速冷冻离心机、CY-5D型超声波仪(探头直径为25 mm)、Scientz-IIID型超声波细胞粉碎机(探头直径为6 mm)、001×7凝胶型阳离子交换树脂、ZR4-6型混凝试验搅拌机,试验所用其它试剂均为进口或国产分析纯和优级纯.

2.2 活性污泥的来源

以实验室SBR反应器的活性污泥(采用人工配水培养,1#污泥)作为研究对象,探讨超声波-树脂法提取活性污泥EPS的方法与程序;以5种不同来源的污泥为研究对象,考察EPS结合磷的效能.5种不

同来源的污泥分别为:实验室以好氧方式运行的SBR反应器污泥,SRT约为10 d,每个运行周期为12 h,其中进水5 min、曝气10 h、沉淀110 min、滗水5 min,污泥样品取自曝气结束前,记为1#污泥;实验室SBR反应器的污泥,进水为校区生活污水,SRT为15 d左右,每个运行周期为6 h,其中进水5 min、曝气5 h、沉淀50 min、滗水5 min,污泥样品取自曝气结束前,记为2#污泥;实验室以厌氧/好氧方式运行的SBR反应器的污泥,进水为垃圾渗滤液,SRT为20 d左右,每个运行周期为12 h,其中进水10 min、厌氧搅拌3 h、曝气7 h、沉淀100 min、滗水10 min,污泥样品取自曝气结束前,记为3#污泥;实验室缺氧生物膜+好氧活性污泥系统的污泥,进水为校区生活污水,污泥负荷为0.31~0.42 kg·kg⁻¹·d⁻¹(以单位质量MLSS在单位时间内接受的COD计),缺氧生物膜反应器水力停留时间约为2 h,好氧活性污泥区水力停留时间约为4 h,污泥样品取自好氧活性污泥区出水堰处,记为4#污泥;采用A/O工艺城镇污水处理厂的活性污泥,进水以生活污水为主,设计污泥龄为18 d,厌氧区水力停留时间约为2 h,好氧区水力停留时间约为4 h,污泥样品取自好氧区出水堰处,记为5#污泥.

2.3 活性污泥EPS的提取方法

将活性污泥样品,于6000 r·min⁻¹下离心20 min,弃除离心后的上清液,补充pH=7.0的二次蒸馏水,使污泥浓度为8000 mg·L⁻¹(以单位体积混合液含有的VSS质量计)左右,并搅拌均匀.量取60 mL清洗后的污泥,于冰水浴中用21 kHz、40 W(或36 W)的超声波作用2 min.然后,以80 g·g⁻¹ VSS(以单位质量VSS投加的树脂质量计,下同)的树脂投加量,向超声波作用后的污泥投加001×7型阳离子交换树脂,于冰水浴中在550 r·min⁻¹下离子交换反应一段时间.离子交换反应后,用孔径为250 μm的尼龙筛网滤除树脂颗粒,得到EPS和分散污泥的混合液.最后,采用冷冻离心机将混合液于(0±2)℃、8000 r·min⁻¹进行2次20 min的离心分离,2次离心后的上清液为EPS,离心沉淀物视为细菌细胞.

2.4 分析测量方法

多糖采用蒽酮法测定,以葡萄糖作为标准物质;蛋白质和腐殖酸采用修正的Folin酚法测定,分别以牛蛋白血清和腐殖酸钠作为标准物质;DNA采用二苯胺法测定,以2-脱氧-D核糖作为标准物质(Frøund *et al.*, 1996).EPS、细菌细胞以及污泥中的

聚合物总含量均以多糖、蛋白质、腐殖酸和 DNA 之和表征. 采用葡萄糖-6-磷酸脱氢酶 (G6PD) 活性衡量分离过程产生的细胞破损 (Frøund *et al.*, 1996). 用超声波-树脂法 + 封闭回流消解法预处理污泥、EPS 与细菌细胞样品 (Long *et al.*, 2009), 采用钼锑抗分光光度法测量 TP 含量以及 EPS 中的无机磷含量 (APHA, 1995).

3 结果 (Results)

3.1 超声波-树脂法提取 EPS 的方法与程序

图 1 中的 3 条曲线分别为未经超声波处理、经 21 kHz 36 W 超声波处理 2 min 或经 21 kHz 40 W 超声波处理 2 min 后, 树脂搅拌时间对提取聚合物总量的影响. 未经超声波处理和离子交换反应, 直接将污泥样品进行高速离心分离, 提取聚合物总数量仅为 $1.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (以从单位质量 VSS 提取得到的聚合物质量计, 下同), 说明高速离心分离产生的流体牵引力对 EPS 的提取作用很小. 采用 36 W 超声波处理污泥 2 min, 提取聚合物的总数量为 $19.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 采用 40 W 超声波处理污泥 2 min, 提取聚合物的总数量为 $33.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明低频率超声波产生的机械振动、搅拌、剪切作用以及空化效应使部分与污泥絮体结合较弱的 EPS 游离进入液相环境 (Long *et al.*, 2008). 未经超声波处理的污泥, 在树脂投加量为 $80 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ VSS 及搅拌速率为 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下, 提取聚合物的总数量随搅拌时间的增大而增加; 搅拌时间为 90 min 时, 提取量为 $103.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 经 36 W 超声波处理 2 min 的污泥, 与树脂搅拌 ($550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 反应 60 min, 提取聚合物的总数量为 $227.38 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 继续增大搅拌时间, 其总数量仅有少量的增加. 经 40 W 超声波处理 2 min 的污泥, 与树脂搅拌 ($550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 反应 45 min, 提

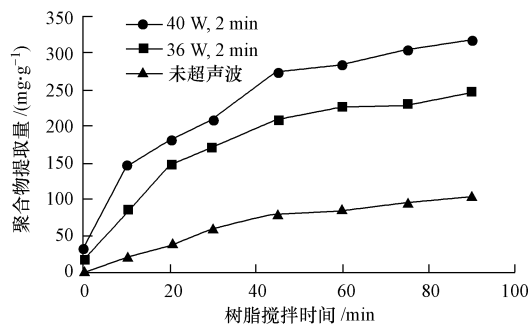


图 1 超声波功率与树脂搅拌时间对聚合物提取量的影响

Fig. 1 Effect of ultrasonic power and stir time on total contents of extracted polymer

取聚合物的总数量为 $272.75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 继续增大搅拌时间, 其总数量仅有少量的增加. 因此, 从提取反应时间与 EPS 产量的角度来考虑, 污泥经 40 W 超声波处理 2 min, 再于 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下与树脂搅拌反应 45 min 为较适宜的提取程序.

采用 G6PD 活性衡量 EPS 提取过程产生的细胞破损较为合理 (Frøund *et al.*, 1996), 主要原因为: G6PD 是细菌细胞中普遍存在的胞内酶, 且在细胞破损后能稳定存在 2 ~ 4 h; 随后, 其活性才逐渐丧失. VSS 约为 $8000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的活性污泥经 Scientz-III 型超声波粉碎机破碎后 (近似认为所有细菌细胞完全破损), 混合液的 G6PD 活性为 $663.1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$. 图 2 为污泥经 40 W 超声波处理 2 min 后于 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下搅拌所得到的树脂搅拌时间与提取聚合物 G6PD 活性的关系. 由图 2 可以看出, 经 21 kHz、40 W 超声波处理 2 min, 提取聚合物的 G6PD 活性为 $4.2 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$, 细胞破损率仅为 0.6%, 说明 40 W 超声波处理 2 min 所产生的细胞破损很小. 经 40 W 超声波作用 2 min 的污泥与树脂搅拌反应 45 min, 提取聚合物的 G6PD 活性为 $43.1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$, 提取过程产生的细胞破损约为 6.5%; 经 40 W 超声波作用 2 min 的污泥同树脂搅拌反应 90 min, 提取聚合物的 G6PD 活性为 $62.2 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$, 细胞破损率约为 9.4%. 从 EPS 产量和细胞破损率两方面综合考虑, 树脂搅拌时间宜为 45 min.

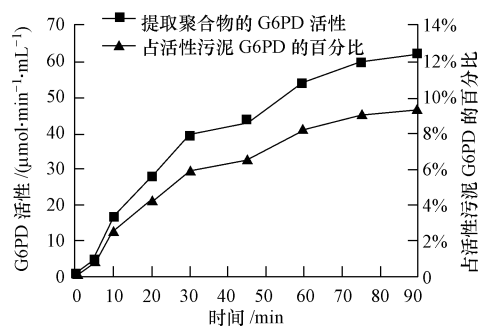


图 2 树脂搅拌时间与提取聚合物 G6PD 活性的关系

Fig. 2 Relation between stir time and the activity of G6PD in extracted polymer

3.2 不同污泥的聚合物含量和磷含量

由表 1 可以看出, 在 5 种污泥中, 以多糖、DNA、蛋白质与腐殖质之和表征的污泥聚合物总含量为 $609.92 \sim 862.61 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 不同来源污泥的 EPS 提取量有较大的差异, 进水为人工配水的 1# 污泥的 EPS 提取量最大, 为 $234.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 占污泥聚合物

总含量的 27.23% ;进水为校区生活污水的 2[#]污泥与 4[#]污泥,分别取自 SBR 系统、缺氧生物膜 + 好氧活性污泥系统,它们的 EPS 提取量分别为 86.58 mg·g⁻¹和 175.96 mg·g⁻¹,占污泥聚合物总含量的 14.20% 和 25.97% . 上述结果说明,进水水质与反应器类型对 EPS 的产量有较大的影响,这是因为

EPS 主要来自进水中的有机物、细菌细胞的代谢产物和自溶产物(Urbain *et al.*, 1993),进水水质与反应器类型影响生化反应过程的生化环境、代谢途径、代谢活性以及微生物的种群结构,进而影响 EPS 的产量.相比之下,不同来源污泥中细菌细胞的聚合物总含量差别不大,为 450.38 ~ 521.39 mg·g⁻¹.

表 1 不同污泥的聚合物含量和磷含量

Table 1 The polymer contents and phosphorus contents in different sludge

| 污泥样品号 | 原污泥 | | EPS | | | 细菌细胞 | |
|----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | 聚合物 /(mg·g ⁻¹) | TP /(mg·g ⁻¹) | 聚合物 /(mg·g ⁻¹) | TP /(mg·g ⁻¹) | 无机磷 /(mg·g ⁻¹) | 聚合物 /(mg·g ⁻¹) | TP /(mg·g ⁻¹) |
| 1 [#] | 862.61 | 34.73 | 234.89 | 19.83 | 5.03 | 521.39 | 16.64 |
| 2 [#] | 609.92 | 45.98 | 86.58 | 15.59 | 10.20 | 477.69 | 29.56 |
| 3 [#] | 631.94 | 19.98 | 130.11 | 9.21 | 6.29 | 450.38 | 11.16 |
| 4 [#] | 677.47 | 26.91 | 175.96 | 11.73 | 4.57 | 457.84 | 15.75 |
| 5 [#] | 714.09 | 40.65 | 178.40 | 14.57 | 6.56 | 476.40 | 27.95 |

不同来源污泥的 TP 含量有较大差别,为 19.98 ~ 45.98 mg·g⁻¹ (以单位质量 VSS 含有 P 的质量计,下同). 其中,进水为垃圾渗滤液的 SBR 反应器的 3[#]污泥的 TP 含量最低,为 19.98 mg·g⁻¹;进水为校区生活污水的 SBR 反应器的 2[#]污泥与采用 A/O 工艺城镇污水处理厂的 5[#]污泥的 TP 含量较高,分别为 45.98 mg·g⁻¹和 40.65 mg·g⁻¹. 不同来源污泥的提取 EPS 的 TP 和无机磷含量也有较大差别. 其中,3[#]污泥 EPS 的 TP 含量最低,为 9.21 mg·g⁻¹;而进水为人工配水 SBR 反应器的 1[#]污泥 EPS 的 TP 含量最高,为 19.83 mg·g⁻¹. 4[#]污泥 EPS 的无机磷含量最低,为 4.57 mg·g⁻¹;而 2[#]污泥 EPS 的无机磷含量最高,为 10.20 mg·g⁻¹. 不同来源污泥的细菌细胞的 TP 含量亦有较大的差别. 其中,3[#]污泥细菌细胞的 TP 含量最低,为 11.16 mg·g⁻¹;2[#]污泥细菌细胞的 TP 含量最高,为 29.56 mg·g⁻¹. 上述结果说明,进水水质和反应器类型对 EPS 与细菌细胞所结合磷的含量有较大的影响.

4 讨论 (Discussion)

4.1 聚合物提取量与 TP 含量的关系

在研究活性污泥 EPS 提取方法与程序的过程中,将实验室 SBR 反应器 1[#]污泥的聚合物提取量与其 TP 含量的关系绘制于图 3 中. 由图 3 可以看出,它们之间的关系可用分段函数近似地描述,见式(1):

$$\begin{cases} y = 0.0531x, & x \leq 262.91 \\ y = 0.0084(x - 262.91) + 13.91, & x > 262.91 \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为聚合物提取量 (mg·g⁻¹); y 为其 TP 含量 (mg·g⁻¹).

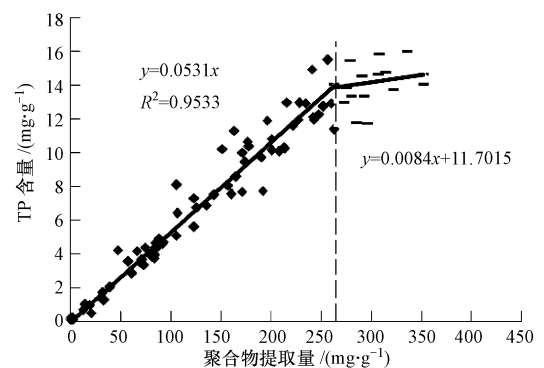


图 3 聚合物提取量与 TP 含量的关系

Fig. 3 The relation between extracted polymer amount and TP content

由式(1)可以看出,对于实验室 SBR 反应器的 1[#]污泥,聚合物的提取量小于 262.91 mg·g⁻¹时,其 TP 含量约占聚合物提取量的 5.31%;聚合物的提取量大于 262.91 mg·g⁻¹以后,其 TP 含量的增加量约占聚合物提取增加量的 0.84%. 可以推断,聚合物的提取量小于 262.91 mg·g⁻¹时,其组成以 EPS 为主,EPS 中 TP 的质量百分比约为 5.31%;聚合物提取量大于 262.91 mg·g⁻¹时,导致大量的胞内聚合物释放到提取物中,胞内聚合物中 TP 的质量百分比约为 0.84%. 结合表 1 可以看出,对于 1[#]污泥,细菌细胞中的 TP 含量约为细菌细胞聚合物含量的 3.19%,大于提取物中胞内聚合物的 TP 含量. 上述结果说明,细胞破损所释放的 TP 包括溶解性和非

溶解性两部分,其中非溶解性 TP 在离心分离过程发生了沉降.这就意味着,超声波-树脂法提取活性污泥 EPS 的过程,细菌细胞破损所释放的胞内聚合物会导致聚合物提取量的明显增大,而释放到提取物中的溶解性 TP 数量则相对较少.

对于实验室 SBR 反应器的 1[#]污泥, EPS 提取量 262.91 mg·g⁻¹为比较理想的 EPS 产量.由图 1 可以看出,污泥经 21 kHz、40 W 超声波处理 2 min 再于 550 r·min⁻¹下树脂搅拌反应 45 min 的分离过程,所得到的 EPS 产量约为 272.75 mg·g⁻¹,同理想值 262.91 mg·g⁻¹十分接近,进一步说明该过程为较优的 EPS 提取程序.

4.2 EPS 结合磷的效能

由表 2 可以看出, EPS 结合了大量的磷.对于 5 种不同来源的污泥, EPS 的 TP 含量为污泥 TP 含量的 34% ~ 57%. EPS 的无机磷含量为其 TP 含量的 25% ~ 68%,占污泥 TP 含量的 14% ~ 31%. EPS 中的无机磷与其结合的高价阳离子有关,并以磷灰石无机磷(AP:钙磷,包括与 Ca 结合的各种磷)与非磷灰石无机磷(NAIP:与 Fe、Mg、Al 氧化物及其氢氧化物结合的磷,不稳定态磷也包括在其中)的形式存在于 EPS 中(Pardo *et al.*, 2004). 2[#]、3[#]、4[#]与 5[#]污泥的反应器的进水均为实际污水,它们 EPS 的无机磷含量为其 TP 含量的 39% ~ 68%,说明在活性污泥处理系统中 EPS 通过高价阳离子的氧化物或氢氧化物结合磷酸盐,是实现生物除磷的重要途径之一. 1[#]污泥反应器的进水中只含有 KH₂PO₄,而 EPS 中约有 75% 的磷(19.83 - 5.03 = 14.8 mg·g⁻¹)以有机磷的形式存在(见表 1),这就意味着细菌细胞的分泌物或代谢产物是 EPS 中有机磷的重要来源.

表 2 EPS 结合磷含量的分析

Table 2 The analysis on the phosphorus-incorporating capability of EPS

| 污泥样品号 | EPS 的 TP 占原污泥 TP 含量的百分比 | EPS 的无机磷占其 TP 含量的百分比 | EPS 的无机磷占原污泥 TP 含量的百分比 |
|----------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 [#] | 57.10% | 25.36% | 14.48% |
| 2 [#] | 33.89% | 65.44% | 22.18% |
| 3 [#] | 46.10% | 68.28% | 31.48% |
| 4 [#] | 43.57% | 38.97% | 16.98% |
| 5 [#] | 35.83% | 45.03% | 16.13% |

Cloete 等采用 X 射线扫描电镜与能谱仪首先观察到活性污泥外层清晰可辨的 EPS 中含有 27% ~ 30% 的磷,并指出细菌细胞的表面及菌胶团的细菌

细胞之间紧密地结合了难以分辨的 EPS (Cloete *et al.*, 1993). 周健等采用阳离子交换树脂法提取活性污泥的 EPS,研究认为絮体中的 EPS 结合了 18% 左右的磷(Zhou *et al.*, 2008). 而本研究采用超声波-树脂法,对于 5 种不同来源的活性污泥,在细菌细胞破损率较低的情况下,提取得到的 EPS 含有 34% ~ 57% 的 TP. 可以推断,超声波-树脂法不仅提取了絮体外层清晰可辨的 EPS,而且提取了部分与细菌细胞紧密结合的 EPS.

由图 4 可以看出,对于 5 种不同来源的污泥, EPS 的 TP 含量分别为其聚合物总含量的 8.4%、18.0%、7.1%、6.7% 与 8.2%,而细菌细胞的 TP 含量分别为其聚合物总含量的 3.2%、6.2%、2.5%、3.4% 与 5.9%. 5 种污泥 EPS 结合磷的能力分别是其自身细菌细胞的 2.6、2.9、2.8、2.0 与 1.4 倍. 上述结果表明 EPS 结合磷的能力大于细菌细胞,是生物絮体中的磷贮存库.

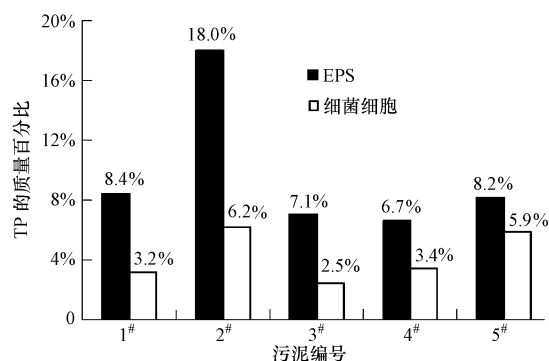


图 4 EPS 和细菌细胞结合磷的效能

Fig. 4 Phosphorous-combining efficiency of EPS and bacterial cells

5 结论 (Conclusions)

1) 超声波-树脂法提取活性污泥 EPS 的较优程序为:采用 21 kHz、40 W 超声波作用污泥 2 min (VSS 约为 8000 mg·L⁻¹);然后,投加 80 g·g⁻¹的阳离子交换树脂,于 550 r·min⁻¹下搅拌 45 min.

2) 对于 5 种不同来源的活性污泥,超声波-树脂法提取得到的 EPS 含量,占污泥聚合物总含量的 14% ~ 28%;EPS 结合的 TP 含量占污泥 TP 含量的 34% ~ 57%,结合的无机磷含量占污泥 TP 含量的 15% ~ 31%. 5 种污泥的 EPS 结合磷的能力分别是其自身细菌细胞(提取 EPS 后的细菌细胞)的 2.6、2.9、2.8、2.0 与 1.4 倍,说明 EPS 是生物絮体中的磷贮存库.

责任作者简介:龙向宇(1979—),男,讲师,博士,主要从事废水生物处理技术与理论研究. E-mail: 2002longxy@sina.com.

参考文献 (References):

- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 1995. In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th ed) [M]. Washington, DC: American Public Health Association
- Cloete T E, Oosthuizen D J. 2001. The role of extracellular exopolymers in the removal of phosphorus from activated sludge[J]. *Water Res*, 35(15): 3595-3598
- Frøund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin[J]. *Water Res*, 30(8):1749-1758
- Li N, Ren N Q, Wang X H, *et al.* 2010. Effect of temperature on intracellular phosphorus absorption and extra-cellular phosphorus removal in EBPR process[J]. *Bioresource Technology*, 101(17): 6265-6268
- 龙腾锐,康健,龙向宇,等. 2009. 超声波-树脂法+封闭回流消解测量污泥总磷的研究[J]. *中国给水排水*, 25(6):81-85
- Long T R, Kang J, Long X Y, *et al.* 2009. Measuring total phosphorus of sludge with ultrasound-cation exchange resin/sealed digestion [J]. *China Water & Wastewater*, 25(6):81-85 (in Chinese)
- 龙向宇,龙腾锐,唐然,等. 2008. 污泥龄对胞外聚合物组分与表面性质的影响[J]. *中国给水排水*, 24(15):1-6
- Long X Y, Long T R, Tang R, *et al.* 2008. Effects of SRT on components and surface characters of extracellular polymeric substances[J]. *China Water & Wastewater*, 24(15): 1-6 (in Chinese)
- Luz E, De-Bashan L E, Bashan Y. 2004. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997—2003) [J]. *Water Res*, 38(19): 4222-4246
- Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* 2007. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. *Water Res*, 41(11): 2271-2300
- Pardo P, Rauret G, López-Sánchez J F. 2004. Shortened screening method for phosphorus fractionation in sediments A complementary approach to the standards, measurements and testing harmonised protocol[J]. *Analytica Chimica Acta*, 508(1):201-206
- Urbain V, Block J C, Manem J. 1993. Bioflocculation in activated sludge: an analytic approach [J]. *Water Res*, 27(5): 829-838
- Wu G X, Rodgers M. 2010. Dynamics and function of intracellular carbohydrate in activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 49(2):271-276
- 周健,栗静静,龙腾锐,等. 2008. 胞外聚合物 EPS 在废水生物除磷中的作用[J]. *环境科学学报*, 28(9): 1758-1762
- Zhou J, Li J J, Long T R, *et al.* 2008. Study on the action of extracellular polymeric substances (EPS) in biological phosphorus removal from wastewater[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(9):1758-1762 (in Chinese)