第 32 卷第 4 期
2012 年 4 月

环 境 科 学 学 报
Acta Scientiae Circumstantiae

Vol. 32, No. 4
Apr., 2012

龙向宇,方振东,唐然,等. 2012. 胞外聚合物在生物除磷中作用的研究[J]. 环境科学学报,32(4):784-789
Long X Y, Fang Z D, Tang R, *et al*. 2012. Roles of extracellular polymer substances in biological dephosphorization[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(4):784-789

胞外聚合物在生物除磷中作用的研究

龙向宇[1,2],方振东[2,*],唐然[2],周从直[2],冯裕钊[2],王恕[2]

1. 后勤工程学院化学工程与技术博士后流动站,重庆 401311
2. 后勤工程学院营房管理与环境工程系,重庆 401311

收稿日期:2011-06-28　　**修回日期**:2011-07-21　　**录用日期**:2011-07-28

摘要:以进水 COD 与 TP 之比分别为 100:1 和 50:1 的两组 SBR 反应器为研究对象,探讨了胞外聚合物(EPS)在生物除磷中的作用. 研究结果表明,EPS 中不仅含有以高价阳离子沉淀物或络合物形式存在的无机磷(IP),而且含有以细菌细胞分泌物或代谢产物形式存在的有机磷(OP). 两组 SBR 反应器活性污泥的厌氧释磷过程主要由 EPS 产生,好氧吸磷过程主要由 EPS 完成;EPS 的除磷量占系统除磷量的 60% ~62%,细菌细胞的除磷量占系统除磷量的 30% ~38%. EPS 对主体液相中磷的去除主要通过 EPS 与主体液相之间磷的间接传输途径来完成,说明 EPS 在生物除磷过程中充当磷储存库的作用.

关键词:胞外聚合物;生物除磷;细菌细胞

文章编号:0253-2468(2012)04-784-06　　**中图分类号**:X703.1　　**文献标识码**:A

Roles of extracellular polymer substances in biological dephosphorization

LONG Xiangyu[1,2], FANG Zhendong[2,*], TANG Ran[2], ZHOU Congzhi[2], FENG Yuzhao[2], WANG Shu[2]

1. Postdoctor Mobile Station of Chemical Engineering and Technology, Logistics Engineering University of PLA, Chongqing 401311
2. Department of Barracks Management & Environmental Engineering, Logistics Engineering University of PLA, Chongqing 401311

Received 28 June 2011; **received** in revised form 21 July 2011; **accepted** 28 July 2011

Abstract: Roles of extracellular polymer substances in biological dephosphorization were investigated in two SBR reactors, of which the ratios of influent COD to TP were respectively 100:1 and 50:1. The results showed that EPS contained not only inorganic phosphate (IP), in the form of precipitation or complex of high valence cations, but also organic phosphate (OP) as secretion or metabolite of bacteria. In anaerobic stage the phosphorus released were mostly originated from EPS, while in aerobic stage the phosphorus absorbed were mainly stored in EPS. EPS was accounted for 60% ~62% of the total phosphate removal, in comparison with 30% ~38% by bacteria phosphorus removal. The course of phosphorus removal in EPS was mainly performed through the indirect phosphorus transmission path between EPS and the liquid, suggesting that EPS was the phosphorus storage of biological floc.

Keywords: extracellular polymer substances; biological dephosphorization; bacteria

1　引言(Introduction)

厌氧/好氧生物除磷与反硝化除磷是实现生物强化除磷的重要途径(Oehmen *et al*., 2007; Wu *et al*., 2010; De-Bashan *et al*., 2004),然而上述两种理论不能解释所有的生物除磷现象. 近年来,有研究认为,EPS 参与了生物除磷过程,Cloete 等(2001)采用 X 射线扫描电镜与能谱仪联用,观察到取自两个污水处理厂的活性污泥絮体外层清晰可辨的 EPS 中含有 27% ~30% 的磷. 周健等(2008)采用阳离子交换树脂法提取 EPS,认为 EPS 中含有 15% ~18% 左右的磷,厌氧过程中主体液相磷浓度的升高源自 PAOs 与 EPS 两者的释磷作用;污泥龄越大,EPS 所贮存的磷含量越高. Li 等(2010)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%. Delvasto 等(2009)采用

基金项目:中国博士后科学基金(No. 20110491845);重庆市自然科学基金资助项目(No. CSTC2009BB7175)

Supported by the Postdoctoral Science Foundation of China(No. 20110491845) and the Natural Science Foundation of Chongqing Municipality (No. CSTC2009BB7175)

作者简介:龙向宇(1979—),男,讲师(博士),E-mail:2002longxy@sina.com; * **通讯作者(责任作者)**,E-mail: fzdhg@tom.com

Biography: LONG Xiangyu (1979—), male, lecturer (Ph. D.), E-mail:2002longxy@sina.com; * **Corresponding author**, E-mail: fzdhg@tom.com

Burkholderia caribensis FeGL03 菌去除巴西高含磷铁矿石中的磷,研究认为微生物从铁矿石中去除的磷不仅存在于细菌细胞成分(磷脂、细胞壁、DNA 等),而且与微生物产生的 EPS 中的 P—O 基团有关. 最新研究表明,超声波-树脂法能在不引入化学污染且细菌细胞破损率较低的情况下,提取絮体外层清晰可辨的 EPS 及部分与细菌细胞紧密结合的 EPS,所提取 EPS 中的 TP 含量占污泥絮体 TP 含量的 34% ~57%(方振东等, 2011). EPS 参与了生物除磷过程,但有关其在生物除磷中的作用大小尚未明确,上述情况不仅与不同研究者所采用的污泥来源不同有关,而且与他们所采用的 EPS 提取方法也有密切的关系(周健等,2008;方振东等,2011).

研究认为,EPS 中的磷可能直接来自污水,并以沉淀物的形式与镁或钙结合(Li *et al.*, 2010);另一方面,EPS 主要来自细菌细胞代谢和自溶所产生的聚合物(Urbain *et al.*, 1993),且 EPS 可作为底物被细菌细胞重新吸收利用(Zhang *et al.*, 2003),说明 EPS 中的磷并非全部直接来自主体液相. 因此,EPS 和主体液相之间磷的转移途径需要进一步深入探讨. 因此,本文以厌氧/好氧方式运行的两组不同进水碳磷比的实验室 SBR 反应器为研究对象,采用超声波-树脂法提取活性污泥的 EPS,考察 EPS 和细菌细胞在生物除磷过程中的作用大小,探讨 EPS 和主体液相之间的磷转移途径,以期进一步明确 EPS 在生物除磷中的作用.

2　材料与方法(Material and methods)

2.1　活性污泥的培养与来源

两组实验室 SBR 反应器的进水采用人工配水,除 COD 与 TP 之比分别为 50:1 和 100:1 外,进水中的其它成分均相同(龙向宇等, 2008). 以葡萄糖、可溶性淀粉和蛋白胨作为复合碳源,以 KH_2PO_4 作为磷源,进水 COD 与 TP 之比为 50:1 的 SBR 反应器记为 1#反应器,进水 COD 与 TP 之比为 100:1 的 SBR 反应器记为 2#反应器. 2 组反应器的污泥龄均为 10 d 左右,运行周期为 12 h,其中,进水 5 min,厌氧搅拌 3 h,曝气 7 h,沉淀 110 min,排水 5 min. 取样时间为反应过程中的 0、1、3、4、6 和 10 h,其中,取样时间为 1 h 和 3 h 的污泥样品为厌氧污泥,取样时间为 4 h、6 h 和 10 h 的污泥样品为好氧污泥.

2.2　EPS 和细菌细胞的分离方法

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,使污泥浓度约为 8000 mg·L^{-1}(以单位体积混合液含有的 VSS 质量计),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 的超声波作用 2 min;然后,以 80 g·g^{-1}(以单位质量 VSS 投加的树脂质量计)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,在冰水浴中于 550 r·min^{-1}下离子交换反应 45 min. 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 和污泥颗粒的混合液. 最后,采用冷冻离心机将混合液于(0 ± 2) ℃、8000 r·min^{-1}下进行 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(方振东等,2011).

2.3　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.*, 2011). EPS 及细菌细胞的聚合物总含量均分别以其多糖、蛋白质、腐殖酸和 DNA 含量之和表示. 采用封闭回流法消解 EPS、细菌细胞与污水样品(龙腾锐等, 2009),用钼锑抗法测量 TP 含量及 EPS 和污水中的无机磷含量.

3　结果(Results)

3.1　厌氧/好氧过程 VSS 和聚合物总含量的变化

从表 1 可以看出,厌氧/好氧过程中两组 SBR 反应器的 VSS 浓度均表现出先增大后降低的趋势. 反应过程的 0 ~6 h,两组反应器的 VSS 浓度随时间增大而升高;6 ~ 10 h,两组反应器的 VSS 浓度略有降低. 1#反应器污泥的 EPS 总含量在厌氧过程降低,好氧过程升高. 0 ~ 1 h,其 EPS 含量迅速降低,由 204.2 mg·g^{-1}(以从单位质量 VSS 提取得到的聚合物总量计,下同)降低为 166.4 mg·g^{-1}, 3 h 时降低为 159.7 mg·g^{-1};好氧初期其 EPS 含量迅速增大,4 h 时为 198.4 mg·g^{-1},此后略有增大,10 h 时为 214.8 mg·g^{-1}. 厌氧/好氧反应过程中 2#反应器污泥的 EPS 总含量有不同的变化情况. 0 ~1 h,其 EPS 含量略有降低,由 189.6 mg·g^{-1} 降低为 169.2 mg·g^{-1},3 h 时升高为 182.6 mg·g^{-1};好氧初期其 EPS 含量略有升高,4 h 时为 202.2 mg·g^{-1},此后其含量变化不大. 对于两组反应器,分离 EPS 后的细菌细胞的聚合物总含量均在厌氧初期降低,后期升

高;好氧初期升高,曝气结束前略有降低.

表 1 厌氧/好氧过程 VSS 和聚合物总含量的变化

Table 1 Variation of VSS and total polymer contents in the anaerobic/aerobic course

反应时间/h	VSS/(mg·L^{-1})		EPS 总含量/(mg·g^{-1})		细菌细胞聚合物总含量/(mg·g^{-1})	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#
0	3240	2941	204.2	189.6	347.7	376.9
1	3429	3090	166.4	169.2	327.0	372.0
3	3495	3247	159.7	182.6	337.6	378.5
4	3526	3301	198.4	202.2	362.0	389.6
6	3531	3330	206.5	208.8	369.8	394.5
10	3478	3210	214.8	197.0	353.7	389.2

3.2 厌氧/好氧过程磷含量的变化

从表 2 可以看出,厌氧过程中两组反应器主体液相的溶解性总磷(TP)和溶解性无机磷(IP)的浓度升高,好氧过程两者的浓度降低,说明厌氧过程污泥絮体发生了磷的释放,好氧过程发生了磷的吸收.厌氧过程中 1#反应器主体液相的溶解性 TP、IP 浓度分别由 15.31、14.79 mg·L^{-1}升高到 33.87、32.55 mg·L^{-1};好氧反应结束前,主体液相的溶解性 TP 和 IP 浓度分别降低到 3.48 mg·L^{-1}和 2.96 mg·L^{-1}.厌氧过程中 2#反应器主体液相的溶解性 TP、IP 浓度分别由 5.49、5.35 mg·L^{-1}升高到 9.56、9.33 mg·L^{-1};好氧反应结束前,主体液相的溶解性 TP 和 IP 浓度分别降低为 0.23 mg·L^{-1}和 0.19 mg·L^{-1}.两组反应器进水的磷源均为 KH_2PO_4,其 TP 浓度分别为 29.32 mg·L^{-1}和 14.66 mg·L^{-1},出水的 TP 浓度分别为 3.48 mg·L^{-1}和 0.23 mg·L^{-1};1#反应器对进水 TP 的去除率约为 88%,2#反应器对进水 TP 的去除率约为 98%.

表 2 主体液相溶解性 TP 和 IP 浓度的变化

Table 2 Variation of soluble TP concentrations and IP concentrations in the liquid

反应时间/h	溶解性 TP /(mg·L^{-1})		溶解性 IP /(mg·L^{-1})	
	1#	2#	1#	2#
0	15.31	5.49	14.79	5.35
1	27.89	9.10	27.11	8.81
3	33.87	9.56	32.55	9.33
4	18.30	3.49	17.99	3.47
6	11.85	1.37	11.30	1.31
10	3.48	0.23	2.96	0.19

从表 3 可以看出,厌氧/好氧反应过程 1#反应器污泥 EPS 的 TP 含量为 4.96% ~6.74%,其 IP 含量为 0.91% ~1.20%,细菌细胞的 TP 含量为 2.57% ~2.69%;2#反应器污泥 EPS 的 TP 含量为 2.66% ~3.54%,其 IP 含量为 0.50% ~0.63%,细菌细胞的 TP 含量为 1.37% ~1.55%.两组污泥 EPS 的磷含量均表现为厌氧过程降低,好氧过程升高.厌氧过程中,1#反应器污泥中 EPS 的 TP 含量由 6.54%降低为 4.96%,降低了 1.58%,好氧反应结束前增大为 6.74%,增加了 1.78%;厌氧过程其 IP 含量由 1.15%降低为 0.91%,降低了 0.24%,好氧反应结束前增大为 1.20%,增加了 0.28%.厌氧过程中,2#反应器污泥 EPS 的 TP 含量由 3.36%降低为 2.66%,降低了 0.70%,好氧反应结束前增大为 3.54%,增加了 0.88%;厌氧过程其 IP 含量由 0.61%降低为 0.50%,降低了 0.11%,好氧反应结束前增大为 0.63%,增加量为 0.13%.上述结果

表 3 厌氧/好氧过程中 EPS 和细菌细胞磷含量的变化

Table 3 Phosphorous content variation of EPS and bacteria in the anaerobic/aerobic course

反应时间/h	EPS 的 TP 含量		EPS 的 IP 含量		细菌细胞的 TP 含量	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#
0	6.54%	3.36%	1.15%	0.61%	2.63%	1.49%
1	5.78%	2.93%	1.02%	0.54%	2.61%	1.43%
3	4.96%	2.66%	0.91%	0.50%	2.57%	1.37%
4	5.90%	3.18%	1.05%	0.59%	2.64%	1.45%
6	6.56%	3.32%	1.16%	0.63%	2.69%	1.46%
10	6.74%	3.54%	1.20%	0.63%	2.67%	1.55%

表明,厌氧/好氧过程中 EPS 进行了厌氧释磷和好氧吸磷,进水磷含量高的活性污泥的 EPS 具有更强的厌氧释磷/好氧吸磷能力.

本试验条件下,细菌细胞的厌氧释磷/好氧吸磷现象不明显(表3).厌氧/好氧反应过程 1#反应器污泥中细菌细胞的 TP 含量变化不大,厌氧过程其含量由 2.63% 降低为 2.57%,降低了 0.06%;好氧反应结束前其含量增大为 2.67%,增加了 0.10%. 2#反应器污泥中细菌细胞的 TP 含量变化相对较大,厌氧过程中其含量由 1.49% 降低为 1.37%,降低了 0.12%;好氧反应结束前其含量增大为 1.55%,增加量为 0.18%.

4　讨论(Discussion)

4.1　EPS 中磷的存在形态

本研究中,厌氧/好氧反应过程 1#反应器污泥 EPS 的 TP 含量为 4.96% ~6.74%,无机磷(IP)含量为 0.91% ~1.20%,则其有机磷(OP)含量为 4.05% ~5.54%;2#反应器污泥 EPS 的 TP 含量为 2.66% ~3.54%,IP 含量为 0.50% ~0.63%,则其 OP 含量为 2.16% ~2.91%. 上述结果说明,EPS 中不仅存在 IP,而且存在大量的 OP. Li 等(2010)采用能谱仪观察到所有的 EPS 样品中均存在钠、镁、钙、钾及少量的铁和铝,认为 EPS 中的磷可能以沉淀物的形式与镁或钙结合,低温条件下磷酸镁沉淀在 EPS 中,对磷的去除起到了重要的作用. 刘亚男等(2005)考察了相同进水微量元素成分、不同碳源的 SBR 生物除磷系统的除磷效果,发现以葡萄糖为碳源的活性污泥 EPS 的磷含量高于其它污泥 EPS 的磷含量,说明在进水金属元素相同的条件下,由于生化反应电子给体的改变引起了 EPS 总量和成分的变化,从而使其具有不同的磷含量,同时表明 EPS 中的磷并非完全以 IP 的形式存在. Urbain 等(1993)研究认为,EPS 主要来源于微生物的代谢产物和自溶产物,这就意味着微生物的代谢过程和溶菌作用是 EPS 中 OP 的重要来源. 方振东等(2011)研究发现,只以 PO_4^{3-} 作为磷源的 SBR 反应器中活性污泥 EPS 中约有 75% 的 TP 以 OP 的形式存在,也推断细菌细胞的分泌物或代谢产物是 EPS 中 OP 的重要来源. 因此,EPS 中不仅含有以高价阳离子沉淀物或络合物形式存在的 IP,同时也含有以细菌细胞分泌物或代谢产物形式存在的 OP.

4.2　EPS 在生物除磷中的作用大小

从表4可以看出,厌氧过程中 1#反应器污泥的 EPS 向液相释放的 TP 量为 15.58 $mg\cdot L^{-1}$(43.26 – 27.68),而细菌细胞在宏观上表现为厌氧吸磷,吸收的 TP 量为 0.65 $mg\cdot L^{-1}$(30.29 – 29.64);好氧过程中 1#反应器污泥的 EPS 从液相吸收的 TP 量为 22.68 $mg\cdot L^{-1}$(50.36 – 27.68),细菌细胞从液相吸收的 TP 量为 2.59 $mg\cdot L^{-1}$(32.88 – 30.29). 整个反应过程 1#反应器污泥 EPS 的除磷量为 7.1 $mg\cdot L^{-1}$(22.68 – 15.58),占系统除磷量(15.31 – 3.48 = 11.83 $mg\cdot L^{-1}$)(表2)的 60% 左右;细菌细胞的除磷量为 3.24 $mg\cdot L^{-1}$(2.59 + 0.65),占系统除磷量的 30% 左右. 厌氧过程 2#反应器污泥的 EPS 向液相释放的 TP 数量为 2.96 $mg\cdot L^{-1}$(18.72 – 15.76),而细菌细胞的宏观释磷量很小,释放的 TP 量为 0.07 $mg\cdot L^{-1}$(18.21 – 18.14);好氧过程中 2#反应器污泥的 EPS 从液相吸收的 TP 量为 6.59 $mg\cdot L^{-1}$(22.35 – 15.76),细菌细胞从液相吸收的 TP 量为 2.28 $mg\cdot L^{-1}$(20.42 – 18.14). 整个反应过程 2#反应器污泥 EPS 的除磷量为 3.63 $mg\cdot L^{-1}$,约占系统除磷量(5.49 – 0.23 = 5.26 $mg\cdot L^{-1}$)的 62%;细菌细胞的除磷量为 2.21 $mg\cdot L^{-1}$(2.28 – 0.07),约占系统除磷量的 38%.

表 4　混合液中 EPS 和细菌细胞的磷含量变化

Table 4　Phosphorous content variation of EPS and bacteria in solid-liquid mixture

反应时间/h	EPS 的 TP 含量/($mg\cdot L^{-1}$)		EPS 的 IP 含量/($mg\cdot L^{-1}$)		细菌细胞的 TP 含量/($mg\cdot L^{-1}$)	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#
0	43.26	18.72	7.61	3.38	29.64	18.21
1	32.97	15.30	5.83	2.83	29.21	18.27
3	27.68	15.76	5.09	2.97	30.29	18.14
4	41.29	21.22	7.35	4.04	33.69	19.89
6	47.81	23.10	8.85	4.87	35.17	20.36
10	50.36	22.35	8.94	4.29	32.88	20.42

周健等(2008)采用阳离子交换树脂法提取以校区生活污水为进水、采用厌氧/好氧方式运行的SBR反应器活性污泥的EPS,结果发现,EPS的除磷量占系统除磷量的15.7%,细菌细胞的除磷量占系统除磷量的84.3%. Li等(2010)采用阳离子交换树脂法提取以乙酸钠为碳源、采用厌氧/好氧方式运行的SBR反应器活性污泥的EPS,结果表明,EPS的除磷量占系统除磷量的4.2% ~13%. 然而,在本试验条件下,EPS的除磷量占系统除磷量的60% ~62%,细菌细胞的除磷量占系统除磷量的30% ~38%,与上述研究存在差异. 这一方面与因进水底物组成不同而导致活性污泥的微生物种群结构不同有关,另一方面与超声波-树脂法较阳离子交换树脂法有更高的EPS提取效率有关. 最新研究表明,在树脂搅拌反应时间为45 min的条件下,超声波-树脂法产生的细胞破率仅为6.5%,但其提取量是阳离子交换树脂法的3.5倍(方振东等,2011). 因此,本研究得到的EPS除磷量远高于其它研究的试验结果,主要取决于所采用的超声波-树脂法有更高的EPS提取效率.

4.3 EPS除磷途径的探讨

从表2可以看出,厌氧/好氧过程两组反应器主体液相的溶解性IP约为溶解性TP的95%,溶解性IP是主体液相溶解性TP的主要存在形式. 由表4可以看出,厌氧/好氧过程中EPS的IP含量变化很小,说明EPS直接向主体液相释放或吸收的IP数量较少. 对于1#反应器,厌氧过程EPS向主体液相释放的IP量为2.52 mg·L^{-1}(7.61 -5.09),占主体液相溶解性TP增加量(33.87 -15.31 =18.56 mg·L^{-1})的13.6%;好氧过程EPS从主体液相吸收的IP为3.85 mg·L^{-1}(8.94 -5.09),占主体液相溶解性TP减少量(33.87 -3.48 =30.39 mg·L^{-1})的12.7%. 对于2#反应器,厌氧过程EPS向主体液相释放的IP量为0.41 mg·L^{-1}(3.38 -2.97),为主体液相溶解性TP增加量(9.56 -5.49 =4.07 mg·L^{-1})的10.1%;好氧过程EPS从主体液相吸收的IP为1.32 mg·L^{-1}(4.29 -2.97),为主体液相溶解性TP减少量(9.56 -0.23 =9.33 mg·L^{-1})的14.1%. 上述结果说明,在本试验条件下,厌氧/好氧反应过程EPS与主体液相之间磷的转移包含了它们之间直接传输无机磷的过程(见图1中的虚线途经),但该途径不起主导作用. 根据物料守恒定律,可以推断EPS与主体液相之间磷的转移主要通过它们之间的间接传输磷过程来完成(见图1中的实线途经). 在间接传输磷过程中,厌氧条件下细菌细胞吸收EPS中的有机物或含磷有机物,进行厌氧代谢,分解细胞内的能量物质,并以溶解性IP为主要形式向液相释放磷;好氧条件下细菌细胞吸收液相中的溶解性IP,同时进行好氧代谢,快速合成胞内物质,进行细胞增殖,并将胞内剩余的有机物或含磷有机物以代谢产物或分泌物的形式排出至体外,以EPS的形式贮存磷源与部分能量物质. EPS与主体液相之间间接传输磷的过程,说明EPS是生物絮体中的磷贮存库.

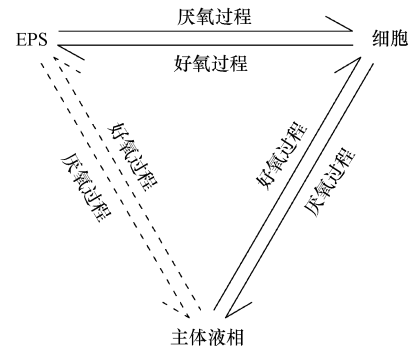


图1 EPS与主体液相之间磷的转移途径(虚线为第一条途径,实线为第二条途径)

Fig. 1 Transmission path of phosphorus between EPS and liquid

5 结论(Conclusions)

1)EPS中不仅含有以高价阳离子沉淀物或络合物形式存在的IP,而且含有以细菌细胞分泌物或代谢产物形式存在的OP.

2)两组SBR反应器活性污泥的厌氧释磷过程基本上完全由EPS产生,好氧吸磷过程主要由EPS完成;EPS的除磷量占系统除磷量的60% ~62%,细菌细胞的除磷量占系统除磷量的30% ~38%.

3)EPS对主体液相中磷的去除主要通过EPS与主体液相之间磷的间接传输途径来完成,说明EPS在生物除磷过程中充当磷储存库的作用.

责任作者简介:方振东(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事废弃物处理技术与理论的研究. E-mail: fzdhg@tom.com.

参考文献(References):

Cloete T E, Oosthuizen D J. 2001. The role of extracellular exoplymers in the removal of phosphorus from activated sludge[J]. Water Res, 35(15): 3595-3598

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

Delvasto P, Ballester A, Muñoz J A, *et al*. 2009. Mobilization of phosphorus from iron ore by the bacterium *Burkholderia caribensis* FeGL03[J]. Minerals Engineering,22(1):1-9

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*. 22011. The phosphorus-incorporating property of extracellular polymer substances [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(11):2374-2379 (in Chinese)

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

刘亚男,于水利,赵冰洁,等.2005. 胞外聚合物对生物除磷效果影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 37(5):623-625

Liu Y N, Yu S L, Zhao B J, *et al*. 2005. Study on the role of extracellular exopolymers in biological phosphorus removal [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 37 (5): 623-625 (in Chinese)

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)

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

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

Zhang X Q,Bishop P L. 2003. Biodegradability of biofilm extracellular polymeric substances [J]. Chemosphere, 50 (1):63-69

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)