

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

胞外聚合物 EPS 在废水生物除磷中的作用

周健*, 栗静静, 龙腾锐, 吴志高, 刘明月

重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045

收稿日期: 2007-09-05 修回日期: 2008-03-10 录用日期: 2008-06-26

摘要: 对 EPS 在废水生物除磷中的作用机理进行系统研究, 探讨和完善生物除磷机理。试验结果表明, 在生物除磷系统中, EPS 贮存了部分磷, 在生物除磷中起着重要的作用。在厌氧-好氧交替过程中, EPS 中磷含量呈厌氧减少、好氧增加的周期性变化; 污泥中的磷有 82% 左右被聚磷菌吸收, 另外 18% 左右的磷聚集在 EPS 中; 一个运行周期中基质所减少的磷 84.3% 被聚磷菌过量吸收, 15.7% 被贮存于 EPS 中; EPS 对磷的去除能力与 EPS 的含量正相关。此外, 泥龄对 EPS 影响较大, 对 EPS 在生物除磷中的作用影响显著, 泥龄越长, EPS 含量越高, EPS 中所贮存的磷含量越高, 而磷负荷对 EPS 除磷影响不显著。

关键词: 胞外聚合物; 生物除磷机理

文章编号: 0253-2468(2008)09-1758-05 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

Study on the action of extracellular polymeric substances (EPS) in biological phosphorus removal from wastewater

ZHOU Jian*, LI Jingjing, LONG Tengrui, WU Zhigao, LIU Mingyue

Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045

Received 5 September 2007; received in revised form 10 March 2008; accepted 26 June 2008

Abstract: The mechanisms of biological removal of phosphorus are discussed and the influence of extracellular polymeric substances (EPS) is investigated. EPS plays an important role in phosphorus removal by storing phosphorus. During an alternating anaerobic-aerobic process, a periodic variation was observed. The phosphorus content increased under aerobic conditions but decreased under the anaerobic conditions. Approximately 82% of P in the sludge was absorbed by the poly-phosphate accumulating organisms (PAOs) and the remaining 18% were enriched in the EPS. During a cycle, approximately 84.3% of the reduced phosphorus in the substrate was absorbed by the PAOs while 15.7% of it was stored in the EPS. The removal of phosphorus by EPS was positively correlated with the EPS content. The sludge retention time (SRT) affected the content of EPS and hence its phosphorus removal ability. Higher SRT resulted in higher EPS and higher phosphorus content. Phosphorus loads showed marginal impact on phosphorus removal.

Keywords: extracellular polymeric substances (EPS); mechanisms of biological phosphorus removal

1 引言 (Introduction)

目前,对于生物除磷机理,普遍接受和认可的是“聚合磷酸盐 (poly-P) 累积微生物”PAO (Polyphosphate Accumulating Organisms) 的摄/放磷原理,并且多数研究集中于相关机理的微生物学特性及生化模型方面。

1993 年荷兰的 Kuba 在试验中观察到兼性厌氧反硝化细菌 DPB (Denitrifying Phosphorus Removing Bacteria) 除磷现象 (田淑媛等, 2001)。Kuba 等

(1997) 研究表明,DPB 的除磷效果相当于总聚磷菌的 50% 左右。近年来有研究者发现,在生物除磷工艺中的污泥胞外聚合物 EPS (extracellular polymeric substances) 中也含有相当数量的磷 (Cloete T E et al, 2001), 并不是所有磷的去除都可解释为聚磷菌的聚磷结果。对此, 相关研究报道较少 (刘亚男等, 2005), 因此, 有必要对 EPS 在生物除磷中的作用机理进行系统研究。本研究主要探讨 EPS 在生物除磷中的作用, 并对泥龄及磷负荷对 EPS 除磷的影响进行研究, 以进一步完善生物除磷机理。

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目 (No. 2004BA604A01-01)

Supported by the 10th Five Years Key Programs for Science and Technology Development of China (No. 2004BA604A01-01)

作者简介: 周健(1964—), 女, 教授; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zhoujian@126.com

Biography: ZHOU Jian(1964—), female, professor; * Corresponding author, E-mail: zhoujian@126.com

2 试验材料及方法 (Materials and methods)

2.1 试验材料

试验水质:以校园生活污水作为试验用水,另外加入磷酸二氢钾调节 TP,使其达到试验用水要求,试验水质见表 1.

表 1 试验水质表

Table 1 Quality of inflow water during the experiment

COD /(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	TN /(mg·L ⁻¹)	TP /(mg·L ⁻¹)
350~400	240~290	12~18	各试验不同

试验装置:试验装置见图 1,由 SBR 反应器、定时器、曝气机和磁力搅拌器组成。其中,SBR 反应器有效容积 6L。

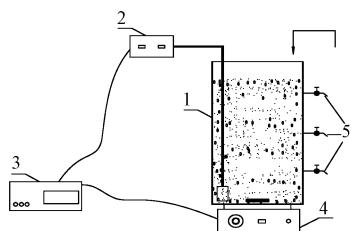


图 1 试验装置图(1. SBR 反应器, 2. 曝气机, 3. 定时器, 4. 磁力搅拌器, 5. 取样及排水口)

Fig. 1 Diagram of the experimental equipment(1. Sequence batch reactor, 2. Aeration machine, 3. Timer, 4. Magnetic stirrer, 5. Sample and outfall)

2.2 试验方法

2.2.1 EPS 在污水生物除磷中的作用研究 在水温 30℃、pH 为 7.0、BOD₅ 负荷为 0.25~0.30 kg·kg⁻¹·d⁻¹、泥龄为 9d、进水 PO₄³⁻ 为 6.5~7.5 mg·L⁻¹ 的条件下,反应器运行周期为 6h(进水 0.5h-厌氧 2h-好氧 3h-排水 0.5h)。周期运行过程中逐时取样,测定污泥中 PHB、EPS、EPS 中 TP 和 PO₄³⁻ 等指标。

2.2.2 泥龄对 EPS 除磷的影响研究 采用 3 个反应器进行平行对比试验。在试验温度为 30℃、pH 为 7.0、反应器运行周期为 6h(进水 0.5h-厌氧 2h-好氧 3h-排水 0.5h)的条件下,考察泥龄分别为 5、12、18d 时对 EPS 生物除磷的影响,周期运行过程中逐时取样,测试 COD、TP、PO₄³⁻ 及 EPS 等指标。

2.2.3 磷负荷对 EPS 除磷的影响研究 采用 3 个反应器进行平行对比试验。试验温度为 30℃、pH 为 7.0、泥龄为 12d、反应器运行周期为 7.5h(进水 0.5h-厌氧 2.5h-好氧 4h-排水 0.5h)条件下,考察各

反应器的磷负荷分别为 3.0、4.5、5.5 mg·g⁻¹ 时,对 EPS 生物除磷的影响,周期运行过程中逐时取样,测定 COD、PO₄³⁻、TP 及 EPS 等指标。

2.3 测试方法

本试验数据的测试均采用标准方法(国家环境保护局,2002)。EPS 提取采用阳离子交换树脂(CER)提取法(Frolund *et al.*, 1996)。EPS 的成分通过测定多糖,蛋白质,核酸的含量来表示,其中多糖采用苯酚-硫酸法测定,蛋白质采用 Lowry 法测定,DNA 采用化学滴定法测定(赵永芳,2002)。污泥中总磷的测定采用碱熔融消解法(周旭红等,2005)。PHB 测定采用紫外分光光度法(豆俊峰等,2005)。EPS 中的总磷和磷酸盐采用标准方法(国家环境保护局,2002)。

3 试验结果 (Results)

3.1 EPS 在废水生物除磷中的作用研究

由图 2 可知,污泥中 PHB 的初始浓度为 15.12 mg·g⁻¹,之后随厌氧时间的延长增加至 107.07 mg·g⁻¹,好氧阶段结束后又减少到 36.31 mg·g⁻¹。基质中的 TP 也表现出厌氧阶段增加,好氧阶段减少的特点,从初始的 7.08 mg·L⁻¹ 升高至 15.66 mg·L⁻¹,然后又下降至 0.33 mg·L⁻¹。由表 2 可知,从 EPS 中磷的形态来看,EPS 中所含磷主要是磷酸盐。由图 3 可知,EPS 中的 TP 呈厌氧阶段减少、好氧阶

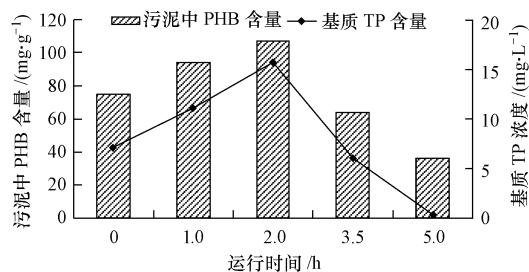


图 2 运行周期内污泥 PHB 含量与基质中 TP 的变化曲线

Fig. 2 Variation of PHB in sludge and TP in substrate in a cycle

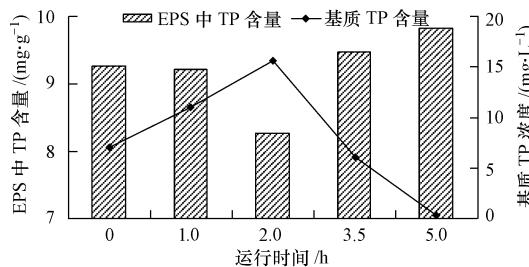


图 3 运行周期内基质与 EPS 中 TP 的变化曲线

Fig. 3 Variation of TP in substrate and in EPS in a cycle

段增加的趋势。由图4可知,一个运行周期内,污泥中的EPS含量在厌氧时阶段逐渐减少到 $29.51\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,好氧阶段结束时又上升至 $35.11\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

由表2可知,一个运行周期结束时,污泥中的TP含量从 $50.85\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $54.65\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,EPS中的TP含量从 $9.26\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 $9.82\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,EPS中的TP含量占污泥中TP含量的百分比从18.21降至17.97, EPS的除磷率为15.7%。

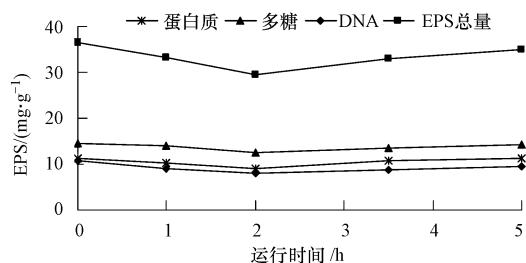


图4 运行周期内EPS含量及EPS总量的变化曲线

Fig. 4 Variation of content of EPS in a cycle

表2 运行周期内基质、EPS及污泥中TP含量对比

Table 2 Comparison of TP in substrate, EPS and in sludge in a cycle

取样时间	基质TP含量/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	污泥TP含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	EPS中TP含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	EPS中磷酸盐含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	EPS中TP含量/污泥中TP含量	EPS除磷率
反应开始	7.08	50.85	9.26	9.23	18.21%	
厌氧末期	15.66	46.41	8.33	8.27	17.95%	15.7%
好氧末期	0.33	54.65	9.82	9.73	17.97%	

3.2 泥龄对EPS除磷的影响研究

试验结果见表3。由表3可知,一个运行周期结束后,泥龄分别为18d、12d及5d的反应器,其污泥

EPS中TP含量分别从 8.23 、 $7.04\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 及 $6.58\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 8.45 、 $7.33\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 及 $7.21\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;相应的EPS除磷率分别为17.31%、15.25%和11.72%。

表3 SRT对EPS及污泥中TP含量影响试验结果

Table 3 Effect of SRT on EPS and content of TP in sludge

SRT/d	取样时间	污泥TP含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	EPS中TP含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	EPS中TP含量/污泥TP含量	EPS总量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	EPS除磷率
5	反应开始	39.24	6.58	16.76%	31.09	
	厌氧末期	31.14	4.72	15.34%	27.28	11.72%
	好氧末期	44.63	7.21	16.15%	31.59	
12	反应开始	37.07	7.04	18.99%	33.91	
	厌氧末期	34.44	6.42	18.65%	29.21	15.25%
	好氧末期	39.16	7.33	18.72%	32.19	
18	反应开始	35.94	8.23	22.90%	37.45	
	厌氧末期	34.47	7.96	23.10%	33.11	17.31%
	好氧末期	37.23	8.45	22.69%	36.38	

3.3 磷负荷对EPS除磷的影响研究

试验结果见表4。由表4可知,磷负荷分别为

表4 磷负荷 N_P 对EPS及污泥中TP含量影响试验结果

Table 4 Effect of N_P on EPS and content of TP in sludge

反应器运行状态	$N_P / (\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$			
	3.0	4.5	5.5	
污泥TP含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	反应开始	34.93	49.24	65.95
	厌氧末期	33.11	47.39	63.52
	好氧末期	36.33	51.07	68.30
EPS中TP含量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	反应开始	7.26	11.26	13.34
	厌氧末期	6.77	10.86	12.56
	好氧末期	7.45	11.60	13.71
EPS中TP含量/污泥TP含量	反应开始	20.79%	22.88%	20.22%
	厌氧末期	20.44%	22.90%	19.77%
	好氧末期	20.51%	22.72%	20.08%
EPS除磷率	15.46%	19.24%	16.92%	

3.0、4.5、5.5 mg·g⁻¹·d⁻¹的反应器,在一个反应周期结束后,其污泥 EPS 中 TP 含量分别从 7.26 mg·g⁻¹·d⁻¹、11.26 mg·g⁻¹·d⁻¹ 和 13.34 mg·g⁻¹·d⁻¹ 增加到 7.45、11.60 mg·g⁻¹·d⁻¹ 和 13.71 mg·g⁻¹·d⁻¹; 污泥中 TP 含量分别从 34.93、49.24 mg·g⁻¹·d⁻¹ 和 65.95 mg·g⁻¹·d⁻¹ 上升到 36.33、51.07 mg·g⁻¹·d⁻¹ 和 68.30 mg·g⁻¹·d⁻¹; 相应的 EPS 除磷率分别为 15.46%、19.24% 和 16.92%.

4 讨论 (Discussion)

4.1 EPS 在废水生物除磷中的作用分析

由图 2 可知,在厌氧条件下,污泥中 PHB 含量和磷酸盐释放量均随时间的延长而增加;而在好氧条件下,污泥细胞内 PHB 含量及基质中磷酸盐浓度则迅速降低。分析认为,厌氧条件下,聚磷细菌厌氧放磷,并将分解产生的无机磷酸盐释放出聚磷于细菌体外;故在污水中 TP 浓度不断增加的同时,污泥中 PHB 的含量逐渐上升。在好氧条件下,PHB 被好氧分解,释放出大量能量供聚磷细菌生长繁殖。当环境中溶解磷存在时,聚磷细菌借助部分能量主动吸收磷酸盐,并以聚磷的形式贮藏在体内,且吸磷量大于先前的厌氧释磷量,在基质中 TP 浓度不断减少的同时,污泥中 PHB 的含量逐渐降低。该生物除磷过程为聚磷细菌的生物除磷。

由表 2 可知,污泥中所含的磷约有 82% 左右聚集在聚磷菌菌体内,另外约 18% 左右的磷聚集在 EPS 中。基质中所减少的磷中 84.3% 被聚磷菌过量吸收,EPS 中增加的磷为 15.7%,并且由图 4 和表 2 可知,EPS 对污水中磷的去除能力与 EPS 的含量正相关。EPS 中 TP 含量较高,占污泥总含磷量(胞内和胞外)的 18.21%,且基本为正磷酸盐;由图 3 可知:EPS 中 TP 含量在厌氧状态下逐渐降低,在好氧状态下逐渐升高,且好氧状态下磷的吸收量略大于厌氧状态下的放磷量。分析认为,在好氧条件下,EPS 中的某些氨基酸、糖类基团,以及 EPS 中所吸附原水中的钙、铁、镁、铜、钴等金属离子(王竞等,2001;董德明等,2003;潘响亮等,2005;田建民,1999),通过离子交换和吸附等方式与基质中的 PO₄³⁻ 离子形成某些特定的化合物和络合物而聚集贮存于 EPS 中。由图 3 可知,在厌氧反应最初的 1h 内,基质中 TP 浓度从 7.08 mg·L⁻¹ 升高至 11.03 mg·L⁻¹,EPS 中 TP 含量从 9.26 mg·g⁻¹ 变至 9.15 mg·g⁻¹,当厌氧反应进行至 2h 内,基质中 TP 浓度

从 11.03 mg·L⁻¹ 升高至 15.66 mg·L⁻¹,EPS 中 TP 含量从 9.15 mg·g⁻¹ 降至 8.33 mg·g⁻¹。分析认为:厌氧过程中基质中 TP 浓度的增加主要来源于聚磷菌和 EPS 的释磷,而对于在厌氧条件下 EPS 的释磷,可能是通过酶和兼性菌的作用,EPS 中部分蛋白质、多糖和 DNA 被降解转化,随之吸附絮凝于 EPS 中的磷被释放出去,使 EPS 中磷的含量减少。在厌氧反应最初的 1h 内,由于酶的作用过程缓慢,EPS 中的 TP 降低较少。EPS 对系统生物除磷有一定的贡献,EPS 对污水基质中磷的去除,主要是通过化学、物化及生化作用,将基质中部分磷聚集贮存于 EPS 中,相当于作为一个磷贮存库。当系统排泥时,EPS 中的磷与细菌胞内过量摄取的磷一起随剩余污泥排出系统外,达到生物除磷的目的。

4.2 泥龄对 EPS 除磷的影响

由表 3 可知,在生物除磷系统中,泥龄对污泥中的 EPS 含量以及 EPS 除磷作用影响较显著。泥龄越长,EPS 含量越高,EPS 中所贮存的总磷含量越高,当泥龄从 5d 逐渐增加到 18d,其 EPS 中的总磷含量占污泥总含磷量的比值从 16.15% 增加至 22.69%,泥龄越大其作为磷贮存库的作用越明显。不同泥龄下 EPS 中总磷含量及其对系统除磷的贡献,可以从 EPS 对基质中磷的去除能力与 EPS 含量的关系进行分析。当泥龄越长,污泥负荷越低,污泥易发生“自溶”,由细胞分泌和自溶产生的 EPS 含量越高(周健等,2005),由此通过 EPS 物理化学和生物化学作用除磷能力越强。同时,泥龄长的反应器污泥浓度较高,EPS 总量大于泥龄小的反应器,故泥龄越长对基质中磷的去除率越高。此外,从反应器运行周期看,泥龄越大的反应器,单位 EPS 的除磷量越小。分析认为,这主要是由于泥龄不同的反应器其优势菌不同,产生的 EPS 及各组份含量不同,泥龄小的反应器生物活性高,产生的 EPS 生物絮凝效能高,故泥龄小的反应器,单位 EPS 的除磷量大。另一方面,由于泥龄小的反应器污泥浓度小于泥龄大的反应器,EPS 总量小于泥龄大的反应器,故泥龄小的反应器 EPS 的磷去除率小。

4.3 磷负荷对 EPS 除磷的影响

由表 4 可知,在生物除磷系统中,磷负荷对污泥中 EPS 的含量影响不大,对 EPS 的除磷能力有一定的影响。磷负荷越高,EPS 中含磷量越高,其作为磷贮存库的作用越明显。但从 EPS 总磷含量占污泥总含磷量的比值,以及同一周期内对污水中磷去除

的贡献来看,磷负荷的影响并不明显。分析认为,本试验中除进水中磷含量不同以外,系统其它运行条件完全一致,因此,反应器内污泥中 EPS 含量并无明显差异。此外,对于除磷效果良好的系统来看,磷负荷越高,细菌含磷量越高,由细胞自溶和细胞分泌所产生的 EPS 中的含磷量相对较高,这或许是不同磷负荷条件下 EPS 中磷含量不同的主要原因。

5 结论(Conclusion)

1) 在生物除磷系统中,EPS 中总磷含量及其各组份含量均随厌氧/好氧工况的交替发生周期性的变化。随厌氧和好氧时间的增加而呈现逐渐下降和上升的趋势,并且 EPS 中磷的含量与 EPS 的含量正相关。

2) 污泥中所含的磷有 82% 左右聚集在聚磷菌体内,另外 18% 左右的磷聚集在 EPS 中。在一个运行周期中,基质中所减少的磷 84.3% 左右被聚磷菌过量吸收,15.7% 左右被贮存于 EPS 中。EPS 主要是通过化学、物化及生化作用,将基质中部分磷聚集于 EPS 中,相当于作为一个磷贮存库。

3) 在生物除磷系统中,泥龄对 EPS 含量影响较大,对 EPS 在生物除磷中的作用影响显著。泥龄越长,EPS 含量越高,EPS 中所贮存的总磷含量越高,其作为磷库的作用越明显。而磷负荷对 EPS 除磷能力的影响不显著。

责任作者简介:周健(1964—),女,教授,博士,主要从事水处理理论与技术的研究。

References:

- Cloete T E, Oosthuizen D J. 2001. The role of extracellular exopolymers in the removal of phosphorus from activated sludge[J]. *Wat Res*, 35 (15):3595—3598
- Dong D M, Kang C L, Li Z H, et al. 2003. The adsorption of heavy metals on extracellular polymers of bacteria in natural water [J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 41 (1):94—96 (in Chinese)
- Dou J F, Luo G Y, Liu X. 2005. The metabolic mechanism of anaerobic phosphorus release and its kinetic analysis during biological phosphorus removal process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25 (9):1164—1169 (in Chinese)
- Frolund B, Palmgren R, Keiding K, et al. 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin[J]. *Water Research*, 30 (8):1749—1758
- Kuba T, Van Loosdrecht M C M. 1997. Occurrence of denitrifying phosphorus removal bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants[J]. *Wat Res*, 31 (4):777—786
- Liu Y N, Yu S L, Zhao B J. 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)
- Pan X L, Wang J L, Zhang D Y, et al. 2005. Copper (II) sorption by EPS of mixed srb population and mechanism [J]. *Technology of Water Treatment*, 31 (39):25—28 (in Chinese)
- State Environmental Protection Administration of China. 2002. Monitor and analysis methods of water and waste water (4th Edition) [M]. Beijing: Chinese Environmental Sciences Press, 211—280 (in Chinese)
- Tian J M. 1999. Using the biopolymer of microorganism ectothiorhodospira shaposhnikovii to remove of heavy metals from waste waters[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 30 (12):175—178 (in Chinese)
- Tian S Y, Yang R, Wang J F, et al. 2001. Study on biological phosphorus removal and biochemical mechanism[J]. *China Water & Waste Water*, 17 (1):71—73 (in Chinese)
- Wang J, Tao Y, Zhou J T, et al. 2001. Biosorption of chromium (VI) ions from aqueous solution by a novel bacterial exopolymers [J]. *Technology of Water Treatment*, 27 (3):145—147 (in Chinese)
- Zhao Y F. 2002. The Technology Principle and Application of Biochemistry[M]. Beijing: Science Press, 11—20 (in Chinese)
- Zhou X H, Cao X H. 2005. Study on the method of total phosphorus in polluted soil[J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 36 (2):41—42 (in Chinese)
- Zhou J, Chai H X, Long T R. 2005. Study on influence factors of extracellular polymers in activated sludge[J]. *Water & Waste Water*, 31 (8):19—23 (in Chinese)

中文参考文献:

- 董德明,康春莉,李忠华,等. 2003. 天然水中细菌胞外聚合物对重金属的吸附规律[J]. 吉林大学学报(理学版), 41 (1):94—96
- 豆俊峰,罗固源,刘翔. 2005. 生物降解除磷过程厌氧释磷的代谢机理及其动力学分析[J]. 环境科学学报, 25 (9):1164—1169
- 国家环境保护局. 2002. 水和废水检测分析方法(第4版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 211—280
- 刘亚男,于水利,赵冰洁. 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
- 潘响亮,王建龙,张道勇,等. 2005. 硫酸盐还原菌混合菌群胞外聚合物对 Cu²⁺ 的吸附和机理[J]. 水处理技术, 31 (39):25—28
- 田建民. 1999. 用微生物外红硫螺菌属形成的生物聚合物去除废水中的重金属[J]. 太原理工大学学报, 30 (12):175—178
- 田淑媛,杨睿,王景峰,等. 2001. 生物除磷及其生化机理研究[J]. 中国给水排水, 17 (1):71—73
- 王竟,陶颖,周集体,等. 2001. 细菌胞外高聚物对水中六价铬的生物吸附特性[J]. 水处理技术, 27 (3):145—147
- 赵永芳. 2002. 生物化学技术原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 11—20
- 周健,柴宏祥,龙腾锐. 2005. 活性污泥胞外聚合物 EPS 的影响因素研究[J]. 给水排水, 31 (8):19—23
- 周旭红,曹晓辉. 2005. 污泥中总磷测定方法探讨[J]. 浙江化工, 36 (2):41—42