

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0012

汪敏刚, 孙培德, 罗涛, 等. 2016. 低浓度铬对 SBR 中微生物抑制影响研究[J]. 环境科学学报, 36(6): 1979-1985

Wang M G, Sun P D, Luo T, et al. 2016. Inhibition effect of low concentration chromium on the microorganism of SBRs[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(6): 1979-1985

低浓度铬对 SBR 中微生物抑制影响研究

汪敏刚, 孙培德*, 罗涛, 鲁轩余

浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012

收稿日期: 2015-11-09 修回日期: 2016-01-03 录用日期: 2016-01-07

摘要: 研究了低浓度铬(三价和六价)对 SBR 生物系统的抑制影响, 考察了两种不同 SBR 工艺(传统工艺和分段进水工艺)在处理含低浓度铬废水过程中常规的出水水质和活性污泥性状的变化, 以及微生物群落的变迁. 研究表明, 在进水总铬(Cr(III):Cr(VI) = 4:1)浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 传统工艺和分段进水工艺的氨氮去除率由 99% 分别下降至 70% 和 65%, 同时, 磷酸盐去除率也由 99% 分别下降至 51% 和 43%. 当进水中总铬浓度达到 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 分段进水工艺 SBR 系统的氨氮和磷酸盐去除率最终分别下降至 44% 和 37%. 此外, 多糖和蛋白质的分泌量变化分别呈下降和上升趋势. 高通量测序结果表明, 活性污泥细菌群落丰富度和多样性受到了铬离子的影响, 并且 *Nitrospira*、*Acidobacteria*、*Planctomycetes*、*Cyanobacteria* 和 *Candidatus_Accumulibacter* 等脱氮除磷功能菌种的生长都受到了一定程度的抑制, 也与被抑制的 SBR 系统脱氮除磷去除率下降的宏观现象相吻合.

关键词: 铬离子; 脱氮除磷; SBR; 高通量测序; 细菌群落

文章编号: 0253-2468(2016)06-1979-07 中图分类号: X703 文献标识码: A

Inhibition effect of low concentration chromium on the microorganism of SBRs

WANG Mingang, SUN Peide*, LUO Tao, LU Xuanyu

School of Environmental Science and Engineering, Zhenjiang Gongshang University, Hangzhou 310012

Received 9 November 2015; received in revised form 3 January 2016; accepted 7 January 2016

Abstract: In order to study the effect of chromium (trivalent and hexavalent) on SBRs with different strategies (general and step-feeding), the water quality indicators, properties of activated sludge, and variation of bacteria communities were investigated. With $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ chromium (80% trivalent and 20% hexavalent) in influent, the ammonia nitrogen removal efficiency of SBRs with general strategy and step-feeding strategy reduced from 99% to 70% and 65% respectively, while the phosphorus removal efficiency reduced from 99% to 51% and 43% respectively. With $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ chromium in influent, the ammonia nitrogen and phosphorus removal efficiency of SBR with step-feeding strategy decline from 99% to 44% and 37% respectively. Moreover, the polysaccharides presented decrease trend while proteins presented increase trend. Results of high-throughput sequencing analysis revealed that richness and diversity of bacteria communities and same functional bacteria of nutrient removal process, such as *Nitrospira*, *Acidobacteria*, *Planctomycetes*, *Cyanobacteria* and *Candidatus_Accumulibacter*, were inhibited. This was consistent with the macro-phenomena.

Keywords: chromium; nutrients removal; SBR; high-throughput sequencing; bacteria

1 引言 (Introduction)

随着工业的发展,越来越多的有毒的难降解污染物,特别是重金属污染物排入到污水处理厂.目前,我国大多污水处理厂都采取活性污泥法,大量重金属污染物的流入使得活性污泥微生物受到毒性抑制(李艳丽, 2014; Cheng et al., 2011),从而导致

COD、氮磷等物质的去除率受到影响,出水难以稳定达标.其中,铬是应用在炼钢、电镀、制革、化工和印染等行业的一类典型的重金属 (Vaiopoulou et al., 2012). Novotnik 等 (2014) 研究发现, Cr(III) 浓度超过 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 Cr(VI) 浓度超过 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,活性污泥硝化过程受到抑制影响. Stasinakis 等 (2002; 2003) 研究表明,当 Cr(VI) 浓度超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氨

基金项目: 浙江省科技计划项目 (No. 2014C03002); 浙江工商大学研究生科技创新项目 (No. 3070KZN0215075)

Supported by the Science and Technology Project of Zhejiang Province (No. 2014C03002) and the Scientific Innovative Research Foundation of Graduate School of Zhejiang Gongshang University (No. 3070KZN0215075)

作者简介: 汪敏刚 (1990—), 男, E-mail: mgwang1126@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: pdsun@126.com

Biography: WANG Mingang (1990—), male, E-mail: mgwang1126@163.com; * Corresponding author, E-mail: pdsun@126.com

氮去除率在 1 d 之内就下降 70%, 超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 活性污泥的生长就会受到抑制. Fang 等 (2012) 研究发现, Cr(VI) 浓度超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生物强化除磷系统 (EBPR) 的除磷效率就会受到抑制. 然而, 这些研究主要考察了铬离子对活性污泥的急性毒性 (即高浓度铬对活性污泥的冲击) 和短期影响 (董国日等, 2010). 根据我国《电镀污染物排放标准》(GB 21900—2008), 总铬排放限值为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可知我国实际污水处理厂的进水中铬离子浓度较低. 因此, 有必要研究低浓度铬对活性污泥系统长期累积效应的影响. 活性污泥工艺中微生物群落的变迁与污染物去除效率有极大的相关性, 研究低浓度铬对活性污泥细菌群落的影响, 特别是关于一些脱氮除磷功能菌的影响机制可以为宏观污染物变化现象提供微观解释. 从微观方面, 本试验通过高通量测序技术分析低浓度铬对 SBR 系统微生物群落的影响机制. 研究结果对于污水生物处理系统的调控和优化有重要的理论价值和实践指导意义.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验用水和活性污泥来源

本试验采用自配制模拟污水, 其母液分为 5 部分, 分别为碳源 (CH_3COONa $32.03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 无水葡萄糖 $23.44 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、氮源 (NH_4Cl $38.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, CaCl_2 $0.45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MgSO_4 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、磷源 (KH_2PO_4 $4.45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、Cr(III) ($3.769 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 Cr(VI) ($2.829 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). 根据试验所需, 使用时配比相应的营养物质比例, 考虑到模拟混合废水, 即有一部分工业废水进入, 污染物浓度较高, 故初始进水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别设为 900 、 100 和 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 活性污泥取自浙江省杭州市七格污水处理厂, 经过 1 个月的驯化培养后再进行抑制试验.

2.2 试验装置

试验采用 SBR 工艺, 试验装置如图 1 所示. 共 4 套 SBR 装置, 为有机玻璃制成的圆柱体, 包含温控隔层, 工艺运行由 DAC (数值模拟转换器) 系统和 LABVIEW 程序智能控制, 反应器内温度通过水浴隔层控制在 $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$, pH 和 DO 通过反馈控制系统分别保持在 7.0 ± 0.2 和 $(4.0 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 污泥浓度 (MLSS) 通过每天测定计算, 控制在 $(3200 \pm 100) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统每个周期运行时间为 8 h, 排水比为 1/3. R1 和 R2 系统采用传统的进水-缺氧 (150 min)-好氧 (300 min)-排泥-排水工艺, 而 R3 和 R4 系统采

用分段进水工艺, 即进水 1/3-缺氧 (45 min)-好氧 (90 min)-缺氧 (45 min)-好氧 (90 min)-缺氧 (60 min)-好氧 (120 min)-排泥-排水.

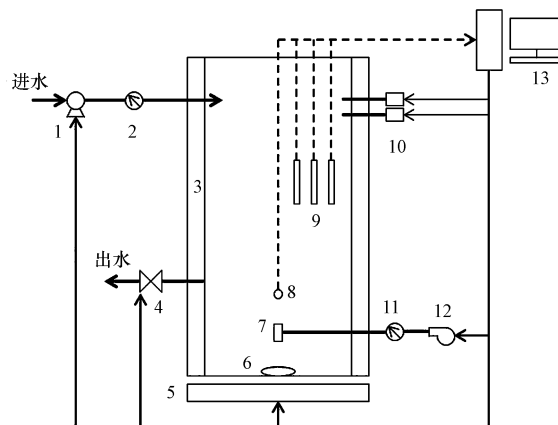


图 1 试验 SBR 装置示意图 (1. 进水泵; 2. 进水流量计; 3. 水浴器; 4. 电磁阀; 5. 磁力搅拌器; 6. 转子; 7. 曝气头; 8. 压力传感器; 9. DO、PH、温度探头; 10. 酸碱蠕动泵; 11. 空气流量计; 12. 曝气机; 13. DAC 系统)

Fig.1 Experimental unit of SBR system

2.3 试验方法

本试验共设 4 套 SBR 反应器, 经过 1 个月的稳定运行后开始铬抑制试验, R1 作为对照组, 进水不添加任何浓度的 Cr. R2~R4 为试验组, R2 和 R3 进水总铬浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, R4 进水总铬浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且 Cr(III) 与 Cr(VI) 浓度比例为 4:1. 每天 3 个运行周期, 定期排泥, 控制系统 MLSS 在指定范围内, 为了观察 SBR 系统的处理性能变化, 每天测量一个周期的进出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和活性污泥的 MLSS 和 SVI, 各指标的测定方法见《水和废水监测分析方法》(第 4 版) (国家环保总局, 2002). 定期测定活性污泥的 EPS, 其中, 糖原测量采取蒽酮法, 蛋白质测量采取 Folin-Lowry 法 (曹秀芹等, 2010). 在抑制试验的初期和末期分别取活性污泥的 DNA, 采用高通量测序技术考察细菌群落变化 (Li *et al.*, 2013).

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 含铬废水对 SBR 系统性能的影响

在低浓度铬条件下 COD 的去除率变化如图 2 所示, 在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 总铬条件下, 4 套 SBR 系统都保持较高的 COD 去除率, 平均分别为 96.8%、96.9%、96.7% 和 95.7%, 相比之下, R4 的 COD 平均去除率最低, 说明 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 总铬条件下

SBR 系统的 COD 去除率受到了一定的影响.活性污泥工艺水中 COD 主要靠异养菌的生长代谢所去除, Wang 等(2013)研究发现, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ni(II) 会造成 SBR 系统 TOC 去除率由 90.2% 降至 75%. Stasinakis 等(2002)的研究表明, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr(VI) 会对有机物的氧化产生抑制. Cheng 等(2011)也发现, SBR 工艺的 COD 去除率在添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cr(VI) 条件下由 93.6% 降至 75.8%. 说明 Cr(VI) 达到一定浓度时, 异养菌去除 COD 的能力会受到抑制作用. 综合本试验结果, 说明低浓度铬对活性污泥系统中异养菌有一定的抑制影响作用.

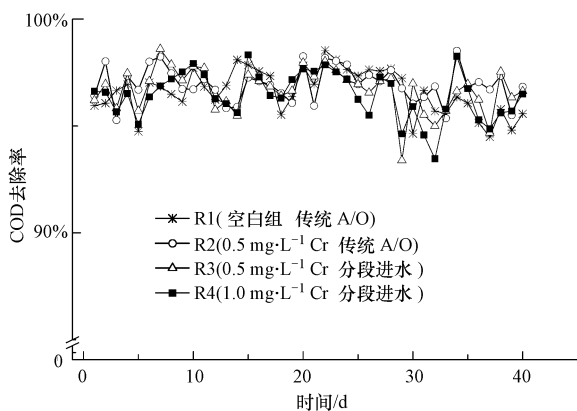


图2 铬对 SBR 系统 COD 去除率的影响

Fig.2 Effect of Cr on COD removal efficiency of SBR systems

SBR 系统中氨氮主要通过硝化菌在好氧条件下氧化为硝态氮, 硝态氮进而在缺氧条件下通过反硝化菌还原为 N_2 , 系统进水和出水亚硝酸浓度都低于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可以认为本试验中不存在亚硝酸盐积累现象. 从图 3a 可以看出, 在总铬浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的进水条件下, 氨氮去除率在第 29 d 出现了显著下降, 并在后续的试验中持续下降, R2、R3 和 R4 系统的氨氮去除率最终分别下降至 70%、65% 和 40%. 说明硝化过程在研究时间段内不会受到低浓度铬的影响, 随着抑制时间的增加, 系统中活性污泥吸附累积的铬达到了一定限量, 抑制了硝化细菌的正常生长和工作, 导致了氨氮去除率下降. 相比 R2 和 R3 系统, 在同样总铬浓度进水条件下, 分段进水工艺受到的抑制作用更强(第 29 d 后, R2 和 R3 的氨氮去除率平均值分别为 86% 和 75%), 可能是因为分段进水增加了缺氧和好氧交替次数, 从而细菌活动更加频繁, 也增加了铬抑制细菌的机会, 导致分段进水更早出现抑制现象. 由图 3b 和图 3c 可见, R3 和 R4 系统出水的硝酸盐浓度明显低于 R1 和 R2 在硝化过程受到抑制之前(29 d 之前), 系统出水硝酸盐浓度平均值分别为 R1 ($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > R2 ($12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > R3 ($5.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > R4 ($5.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 总氮去除率大小依次为 R3 (92%) >

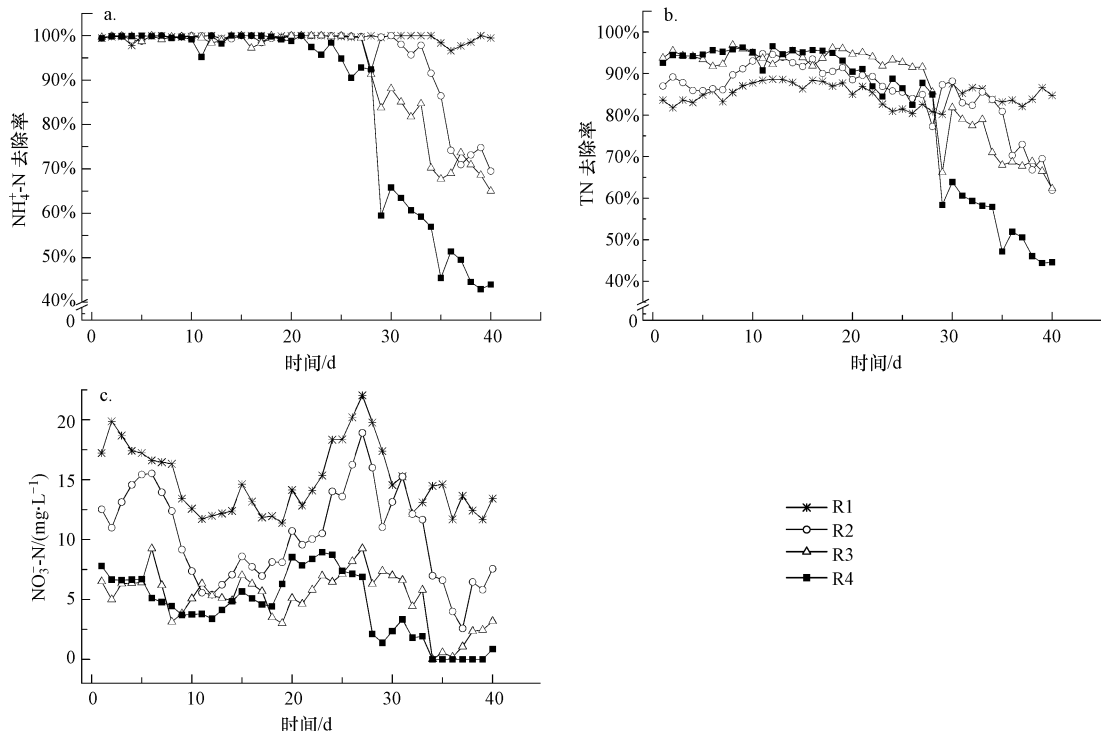


图3 铬对 SBR 脱氮系统的影响(a.系统氨氮去除率, b.系统总氮去除率, c.系统出水硝酸盐浓度)

Fig.3 Effect of Cr on N removal of SBR systems(a. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency, b. TN removal efficiency, c. the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration of effluent)

R4(90%)>R2(87%)>R1(85%).证实了分段进水模式相比 SBR 传统 A/O 工艺具有更高的反硝化效率和总氮去除率.反硝化必须具备缺氧和碳源两个条件,分段进水工艺提供了 3 次反硝化条件,而传统 A/O 工艺只有在进水后的缺氧段才有充足的反硝化条件.试验后期氨氮通过硝化转变为硝酸盐氮的过程受到抑制,导致后期系统出水硝酸盐浓度较低,这也造成了后期 R2、R3 和 R4 的总氮去除率的变化趋势与氨氮去除率变化相近,在第 40 d,分别下降至 62%、62% 和 44%.综合以上结果可得,在长期低浓度铬进水条件下,SBR 工艺的反硝化过程会受到显著的抑制作用,而且分段进水工艺的反硝化过程受到的抑制作用更强;相反,低浓度铬的存在有利于反硝化作用的进行,且分段进水模式相比传统的 SBR 工艺具有更高的反硝化效率.

如图 4 所示,试验前期磷酸盐去除率稳定保持在 99%,随着活性污泥中铬渐渐地积累,R2、R3、R4 系统在第 34、31 和 27 d 陆续出现了磷去除率下降现象,直至试验结束,R2、R3 和 R4 系统磷去除率分别下降至 51%、43% 和 37%.活性污泥系统除磷过程主要依赖于聚磷菌的过量吸磷,研究发现,当 EBPR 系统中 Cr(VI) 高于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其除磷性能逐渐丧失,聚磷菌占全菌的比例由 84.26% 下降至 38.40% (苏斌等,2013).本试验中随着铬离子对 SBR 系统中活性污泥的不断影响,系统内铬累积的量不断增加,聚磷菌生长代谢过程受到了抑制,导致整个系统除磷效率降低.此外,比较 R2 和 R3 系统,同样可发现分段进水工艺更早出现抑制现象,原因可能是分段进水工艺(R3)相比传统 SBR 工艺(R2)提供更多释磷吸磷交替过程.比较 R3 和 R4 系统,可见进水铬浓度越高,抑制现象越早出现,即更易受到抑

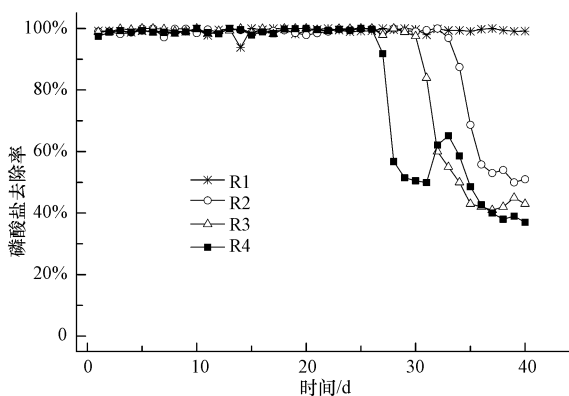


图 4 铬对 SBR 系统磷酸盐去除率的影响

Fig.4 Effect of Cr on $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal efficiency of SBR systems

制影响.总之,在低浓度铬条件下,SBR 系统除磷过程受到了显著的抑制影响.

3.2 活性污泥性状的影响

活性污泥性状在本试验中是用 SVI 值和胞外聚合物分泌量(本试验以多糖和蛋白质为主,DNA 和腐殖酸含量很低)来表征,如图 5 所示,在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 总铬浓度条件下,活性污泥 SVI 值基本不受影响,其值始终与 R1 系统的相接近.然而,在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 总铬浓度条件下,SVI 值在第 36 d 开始上升,直至第 38 d 达到 $160 \text{ mL} \cdot \text{mg}^{-1}$,表明活性污泥出现污泥膨胀现象.

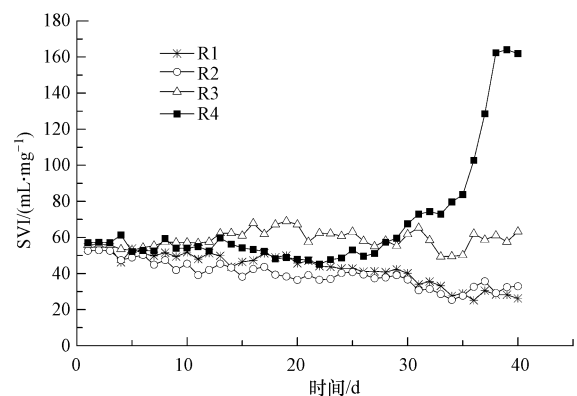


图 5 铬对 SBR 系统 SVI 值的影响

Fig.5 Effect of Cr on SVI of SBR systems

EPS 在低浓度铬的影响下也发生了较大的变化,R2、R3 和 R4 系统多糖的分泌能力受到了抑制,最终的分泌量相比初始值分别下降了 58.7%、59.6% 和 67.7% (图 6a).与之相反,由于微生物可以通过促进蛋白质的分泌来抵御铬的生物毒性,因此,试验开始后出现了蛋白质质量上升的现象(图 6b).由此可见, $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 总铬浓度对 SBR 系统的 SVI 值影响不大,但 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 总铬浓度则会引起污泥膨胀;而且低浓度铬对细胞多糖的分泌功能有抑制作用,对细胞蛋白质合成则有促进作用.

3.3 对 SBR 系统微生物群落的影响

在试验的第 1 d 和第 40 d,提取了活性污泥 DNA 进行高通量测序.表 1 评估了 SBR 系统微生物群落的丰富度和多样性.表中数据表明,各反应器 Coverage 值均较高,基本保持在 0.996 以上,说明本次测序结果具有很好的代表性.OTUs ($\text{R1} > \text{R3} > \text{R2} > \text{R4}$) 和 Chao1 值 ($\text{R1} = \text{R3} > \text{R2} > \text{R4}$) 表明系统中微生物群落的丰富度,说明在低浓度铬的影响下,活性污泥系统微生物群落的丰富度受到了抑制.Shannon 值 ($\text{R3} > \text{R4} > \text{R1} > \text{R2}$) 表征了系统微生物群落的多样

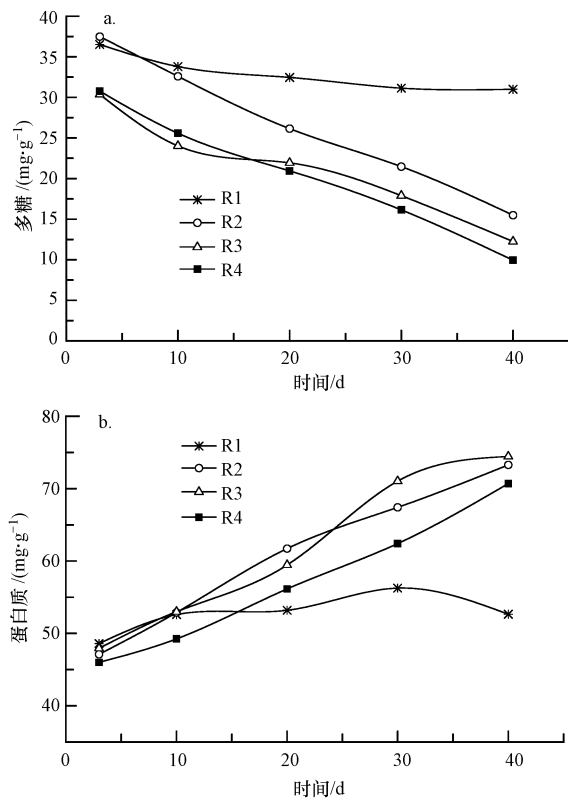


图6 铬对 SBR 系统 EPS 的影响 (a.多糖, b.蛋白质)

Fig.6 Effect of Cr on EPS of SBR systems (a. polysaccharides, b. proteins)

性,可见 SBR 分段进水工艺的活性污泥群落多样性高于传统 SBR 工艺,且系统内微生物群落的多样性也受到了铬离子的抑制作用 ($R2 < R1, R4 < R3$).

表1 SBR 系统微生物群落丰富度和多样性评估

Table 1 Richness and diversity estimation of bacteria in SBRs

反应器	OTUs	Chao1 值	Shannon 值	Coverage 值
R1	270	299	3.5	0.996
R2	259	289	3.3	0.997
R3	265	299	4.1	0.996
R4	258	288	3.8	0.997

注:Chao1 值为估计群落 OTUs 数量的指数,其值越大,表明样品群落微生物丰富度越高;Shannon 值为估算微生物多样性的指数,其值越大,表明样品群落多样性越高;Coverage 值指样品文库的覆盖率,值越高,则样品中序列没有被测出的概率越低。

主要细菌群落变迁如图 7 所示.比较 R1 和 R2 系统,可见在低浓度铬的影响下,许多微生物的生长都受到了抑制,如在脱氮过程中起重要作用的 *Acidobacteria* (由 22.8% 降至 1.2%) (Ma *et al.*, 2015)、*Planctomycetes* (由 12% 降至 1%) (Meng *et al.*, 2015) 和 *Cyanobacteria* (由 2.2% 降至 0.03%),

以及在除磷过程中起主导作用的 *Candidatus _ Competibacter* (由 6.4% 降至 0.12%) 和 *Candidatus _ Accumulibacter* (由 5.5% 降至 0.25%) (Slater *et al.*, 2010) 等,其在系统微生物群落中所占的比例出现大幅度下降,这也是试验后期氨氮和磷酸盐去除率下降的原因.另外,在强化生物除磷系统中经常出现的 *Chlorobi* (王萍等, 2012) 也受到了明显抑制 (由 4.1% 降至 0.7%).另一方面,低浓度铬的条件也促进了一些细菌的生长,导致其在群落中所占比例大大提升,如 *Candidate _ division _ TM7* (由 13% 增至 45%)、*Bacteroidetes* (由 13% 增至 30%) 和 *Zoogloea* (由 0.8% 增至 8.8%) 等.通过比较 R2 和 R3 系统可知,在低浓度铬条件下, SBR 传统 A/O 工艺和分段进水工艺中微生物群落的变化存在差异. *Proteobacteria* 和 *Thauera* 作为主要的反硝化细菌,其在 R3 中所占比例 (分别为 36% 和 3%) 显著大于 R2 中所占比例 (分别为 20% 和 1.1%),从微观角度证明了分段进水工艺有利于反硝化菌的生长,从而提高了 SBR 的反硝化效率.同时,分段进水也更有利于某些其他重要菌种的生长,如 *Rhodocyclaceae* (R2: 3.2%; R3: 11.7%)、*Terrimonas* (R2: 0.4%; R3: 2.8%)、*Azospira* (R2: 0.2%; R3: 3.5%) 和 *Dechloromonas* (R2: 0.16%; R3: 1.7%) 等;比较 R3 和 R4 系统可知,在进水铬浓度增大至 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Bacteroidetes* (R3: 36%; R4: 22%)、*Acidobacteria* (R3: 2.3%; R4: 0.5%)、*Planctomycetes* (R3: 1.8%; R4: 0.4%)、*Rhodocyclaceae* (R3: 11.7%; R4: 2.7%)、*Nitrospira* (R3: 0.5%; R4: 0.07%) 等微生物群落比例都出现了显著的下降.相比其他系统, R4 中出现了一种新的微生物群落—BD1-5,并且占据较大比例 (19%),关于 BD1-5 出现在活性污泥中的报道较少,根据 R4 在第 40 d 时出现了污泥膨胀现象推测 BD1-5 有可能是一种丝状菌.总之,从微生物群落变迁的结果可得,低浓度铬对 SBR 活性污泥系统微生物群落有一定影响,特别是抑制了许多脱氮除磷功能菌的生长,导致了宏观指标去除率下降的现象。

4 结论 (Conclusions)

在含低浓度铬 (总铬浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 进水条件下, SBR 系统的 COD、氨氮、磷酸盐处理性能、活性污泥性状及系统微生物群落都受到了不同程度的影响.传统工艺和分段进水工艺的氨氮去除率由 99% 分别下降至 70% 和 65%,同时,磷酸盐去除率也

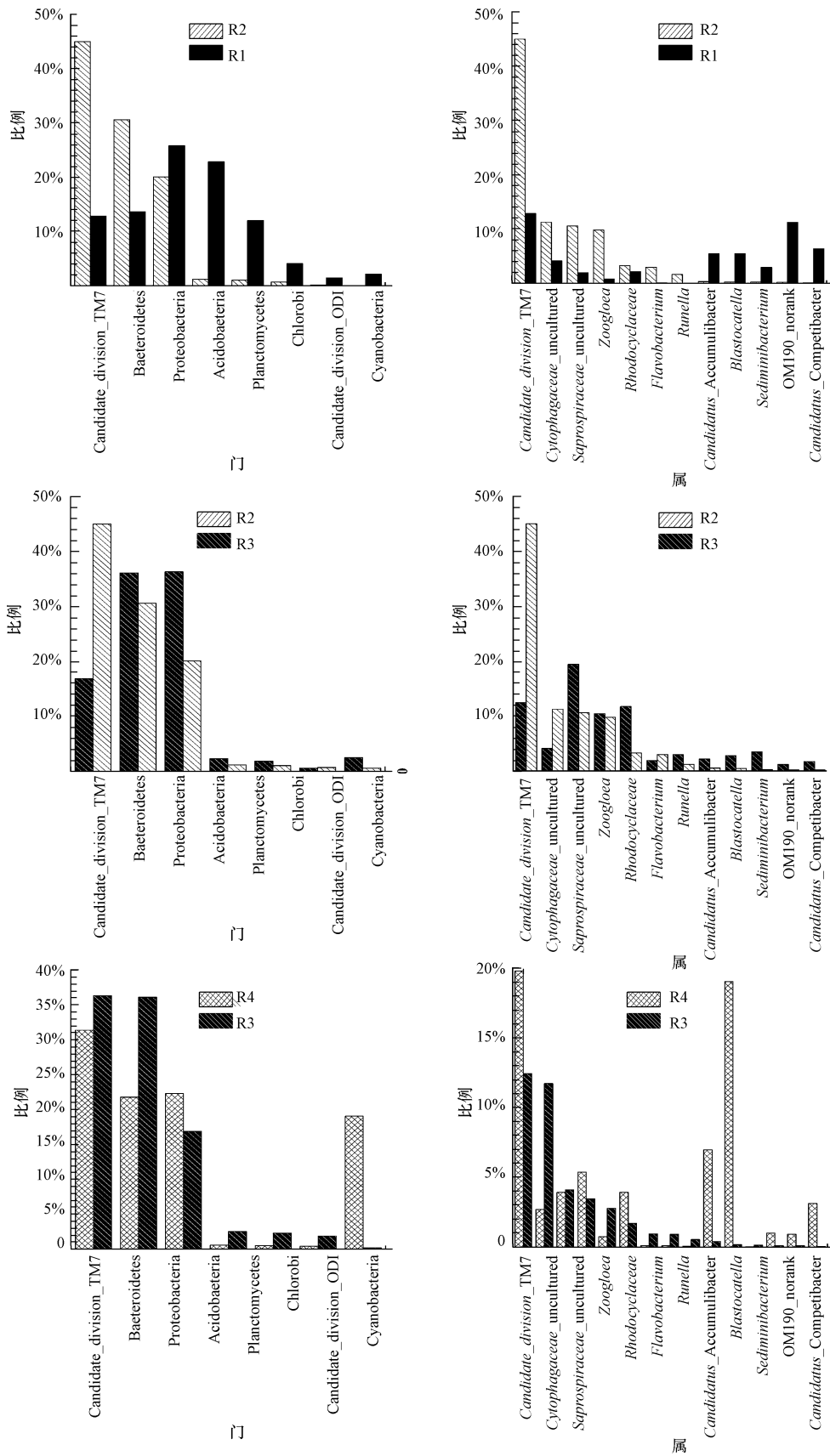


图7 铬对 SBR 系统细菌群落的影响

Fig.7 Effect of Cr on bacteria communities of SBR systems

由 99% 分别下降至 51% 和 43%。比较不同的 SBR 工艺,可发现分段进水工艺在面对重金属铬的抑制时更加敏感;低浓度铬对活性污泥胞外聚合物也有所影响,多糖的分泌量随铬抑制时间的推移而下降,而蛋白质则呈上升趋势;活性污泥细菌群落结构在低浓度铬的影响下也发生了改变,系统微生物群落丰富度和多样性都受到了抑制影响,*Nitrospira*、*Acidobacteria*、*Planctomycetes*、*Cyanobacteria* 和 *Candidatus_Accumulibacter* 等脱氮除磷功能菌的生长都受到了一定程度的抑制,分段进水工艺更有利于其反硝化作用的 *Proteobacteria* 和 *Thauera* 等细菌的生长。

参考文献 (References):

- 曹秀芹,赵自玲.2010.胞外聚合物(EPS)构成的影响因素分析[J].环境科学与技术,33(12F):420-424
- Cheng L, Li X C, Jiang R X, et al. 2011. Effects of Cr(VI) on the performance and kinetics of the activated sludge process [J]. *Bioresource Technology*, 102: 797-804
- 董国日,柳建设,周洪波,等.2010.铬离子对 SBR 工艺活性污泥毒性作用研究[J].环境工程学报,4(4):847-851
- Fang J, Sun P D, Xu S J, et al. 2012. Impact of Cr(VI) on P removal performance in enhanced biological phosphorus removal (EBPR) system based on the anaerobic and aerobic metabolism [J]. *Bioresource Technology*, 121: 379-385
- Ge S J, Peng Y Z, Qiu S, et al. 2014. Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process [J]. *Water Research*, 55: 95-105
- Guo F, Zhang T. 2012. Profiling bulking and foaming bacteria in activated sludge by high throughput sequencing [J]. *Water Research*, 46: 2772-2782
- 国家环保总局.2002.水和废水监测分析方法(第4版)[M].北京:中国环境科学出版社.201-284
- Li B, Zhang X X, Guo F, et al. 2013. Characterization of tetracycline resistant bacterial community in saline activated sludge using batch stress incubation with high-throughput sequencing analysis [J]. *Water Research*, 47: 4207-4216
- 李艳丽.2014.重金属对活性污泥微生物活性的影响[J].广东化工,41(3):141-142
- Ma Q, Qu Y Y, Shen W L, et al. 2015. Bacterial community compositions of coking wastewater treatment plants in steel industry revealed by Illumina high-throughput sequencing [J]. *Bioresource Technology*, 179: 436-443
- Meng F G, Su G Y, Hu Y F, et al. 2015. Improving nitrogen removal in an ANAMMOX reactor using a permeable reactive biobarrier [J]. *Water Research*, 58: 82-91
- Novotnik B, Zuliani T, Ščančar J, et al. 2014. Inhibition of the nitrification process in activated sludge by trivalent and hexavalent chromium, and partitioning of hexavalent chromium between sludge compartments [J]. *Chemosphere*, 105: 87-94
- Slater F R, Johnson C R, Blackall L L, et al. 2010. Monitoring associations between clade-level variation, overall community structure and ecosystem function in enhanced biological phosphorus removal (EBPR) systems using terminal-restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) [J]. *Water Research*, 44: 4908-4923
- Stasinakis A S, Mamais D, Thomaidis N S, et al. 2002. Effect of chromium (VI) on bacterial kinetics of heterotrophic biomass of activated sludge [J]. *Water Research*, 36: 3341-3349
- Stasinakis A S, Thomaidis N S, Giannes A S, et al. 2003. Effect of arsenic and mercury speciation on inhibition of respiration rate in activated sludge systems [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 10: 177-182
- 苏斌,孙培德,方婧,等.2013.低浓度 Cr(VI) 对颗粒化强化生物除磷(EBPR)系统的影响及系统恢复研究[J].环境科学学报,33(5):1231-1238
- Vaiopoulou E, Gikas P. 2012. Effects of chromium on activated sludge and on the performance of wastewater treatment plants: A review [J]. *Water Research*, 46: 549-570
- Wang W, Li X C, Wang P F. 2013. Long-term effects of Ni(II) on the performance and activity of activated sludge processes [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 92: 144-149
- 王加蒙,彭澄瑶,辛振兴.2015.SBR 分段进水工艺提高污水厂的脱氮效率[J].环境工程学报,9(5):2131-2136
- 王萍,余志晟,齐嵘,等.2012.丝状细菌污泥膨胀的 FISH 探针研究进展[J].应用与环境生物学报,18(4):705-512