营养物质对污泥沉降性能的影响及污泥膨胀的控制

陈滢[1], 彭永臻[1*], 刘敏[2], 王淑莹[1], 梁秀荣[1], 高春娣[1]

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用序批式活性污泥工艺(SBR)处理啤酒废水, 研究了 N、P 营养物质的不同缺乏程度对污泥沉降性能的影响, 同时考察了污泥絮体性状和微生物的变化. 结果表明, 原水 BOD_5/N/P 为 100/5/1、100/5/0.8 和 100/4/0.8 时, 污泥沉降性能良好, 没有发生膨胀; BOD_5/N/P 为 100/0.94/0.31、100/2/0.4、100/3/0.6 时发生丝状菌污泥膨胀; BOD_5/N/P 为 100/0.94/1、100/5/0.31、100/5/0.4、100/5/0.6 时发生非丝状菌污泥膨胀. 缺乏营养物质引起的污泥膨胀, 多数情况下补充足够的营养物质后, 膨胀可得到控制. 提高有机负荷有助于改善污泥的沉降性能. 进水 N、P 营养物质同时缺乏时, 可形成直径为 2 mm ~ 6 mm 的颗粒污泥.

关键词: 营养物质; 非丝状菌膨胀; 丝状菌膨胀; 污泥性状

中图分类号: X797 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)06-0054-05

Effect of Nutrient on Sludge Settling Property and Bulking Controls

CHEN Ying[1], PENG Yong-zhen[1], LIU Min[2], WANG Shu-ying[1], LIANG Xiu-rong[1], GAO Chun-di[1]

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The effect of nutrient (N and P) deficiency on activated sludge settleability and characteristics of activated sludge flocs in Sequencing Batch Reactor (SBR) fed with brewery wastewater were investigated. The results showed that the activated sludge had good settling properties at influent BOD_5/N/P was 100/5/1、100/5/0.8 and 100/4/0.8 respectively. When BOD_5/N/P was 100/0.94/0.31、100/2/0.4、100/3/0.6 respectively, the sludge settleability became worse due to excessive growth of filamentous. When BOD_5/N/P was 100/0.94/1、100/5/0.31、100/5/0.4、100/5/0.6 respectively, non-filamentous activated sludge bulking occurred. Adding sufficient nutrient to the influent, the sludge bulking was controlled effectively and the low SVI was recovered. When increasing COD loading rate, the duration of recovery could be diminished. When nitrogen and phosphorus were insufficient synchronously, aerobic granular sludge was formed which was averagely 2 mm ~ 6 mm in diameter.

Key words: nutrient; non-filamentous activated sludge bulking; filamentous activated sludge bulking; aerobic granular sludge

我国大多数工业废水都采用活性污泥法处理, 活性污泥法也因其处理效果好, 运行管理方便而成为废水生物处理的主流方法. 废水生物处理过程中, 营养物质的合理比例(尤其是 C、N、P)是影响活性污泥微生物正常生长代谢, 保障污水处理工艺稳定运行的关键因素. 通常认为活性污泥微生物的正常生化处理应满足 BOD_5/N/P = 100/5/1. 但是许多工业废水(如食品加工废水[1]、酿造废水[2]、制药废水、皮革废水[3]、化工废水等)都存在 N、P 营养元素缺乏的问题. N、P 营养的不足会引发活性污泥运行管理中最棘手的污泥膨胀问题, 致使污泥沉降性能变差、污泥流失, 严重时还会导致整个污水处理系统的崩溃[4].

虽然许多工业废水处理厂都意识到 N、P 营养元素的缺乏是引起污泥膨胀的因素之一, 但迄今为止仍缺乏有关营养物质对污泥沉降性能影响的系统研究. 本试验以啤酒废水为底物, 采用序批式活性污泥法(SBR)系统研究了各种营养物质配比对污泥沉降性能的影响以及污泥膨胀后的恢复控制措施.

1 材料和方法

试验采用序批式反应器(Sequencing Batch Reactor, SBR). 反应器的有效容积为 14 L. 试验所用原水为啤酒废水, 主要含有各种糖类、酵母、蛋白质、醇类和氨基酸等有机物. 进水 COD 浓度为 600 mg/L (BOD_5/COD = 0.618), 以 COD 表示的有机负荷维持在 4 kg/(kg·d) 左右(见图 1).

反应器内混合液悬浮固体浓度(mixed liquor suspended solids, MLSS)维持在 2000 mg/L 左右, DO 浓度在 2.0 mg/L 以上, 水温为(20 ± 1) ℃. 试验中用污泥指数(sludge volume index, SVI)反映污泥沉降性能. 当 SVI 值上升到 150 mL/g 以上时, 认为发生

收稿日期: 2003-09-16; 修订日期: 2004-01-04
基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8022006); 北京市教委科研项目(01 KJ-001)
作者简介: 陈滢(1975 ~), 女, 在读博士生
* 通讯作者, pyz@bjut.edu.cn

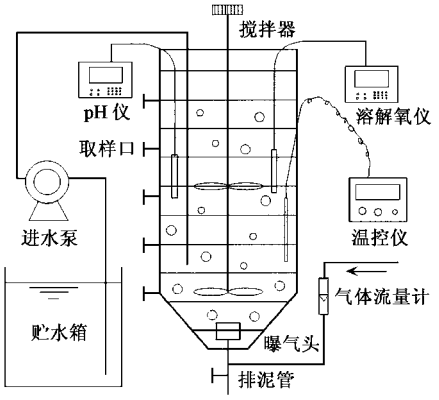

图 1　SBR 系统试验示意图

Fig.1　SBR diagram

污泥膨胀;反之,认为膨胀得到控制.

具体试验方案见表 1.根据试验要求补充加入不同量的氯化铵和磷酸二氢钾而达到所需的 N、P 浓度.

检测项目主要有污泥沉降比(Settling Velocity, SV%)、SVI、MLSS、COD、TN、TP、DO,按标准分析方法进行检验.同时观察污泥絮体的形态、沉降性,混合液的可滤性,出水上清液清澈与否及显微镜下观察活性污泥中微生物的变化.

2　结果与讨论

2.1　N、P 同步缺少对污泥沉降性能的影响

根据表 1,首先研究了进水中 C 充足,而 N、P 浓度同时缺少对活性污泥沉降性能的影响,即 BOD_5/N/P 为 100/4/0.8、100/3/0.6、100/2/0.4、100/0.94/0.31.另外,在同样试验条件下,又同步做了一组 N、P 营养充足,即 BOD_5/N/P 为 100/5/1 的情况作为对照试验.试验结果如图 2 所示.污泥具体性状见表 2.

表 1　试验方案

Table 1　Description of the experimental campaigns

N、P 同步缺少 BOD_5/N/P	100/0.94/0.31	100/2/0.4	100/3/0.6	100/4/0.8	100/5/1
进水 TN 浓度/ $mg\cdot L^{-1}$	3.49	7.42	11.12	14.83	18.54
进水 TP 浓度/ $mg\cdot L^{-1}$	1.15	1.48	2.22	2.97	3.70
N 充足,P 减少 BOD_5/N/P	100/5/0.31	100/5/0.4	100/5/0.6	100/5/0.8	100/5/1
进水 TN 浓度/ $mg\cdot L^{-1}$	18.54	18.54	18.54	18.54	18.54
进水 TP 浓度/ $mg\cdot L^{-1}$	1.15	1.48	2.22	2.97	3.70
P 充足,N 缺少 BOD_5/N/P	100/0.94/1				
进水 TN 浓度/ $mg\cdot L^{-1}$	3.49				
进水 TP 浓度/ $mg\cdot L^{-1}$	3.70				

表 2　营养物质对活性污泥沉降性能的影响/ $mg\cdot L^{-1}$

Table 2　The characteristics of activated sludge at different influent BOD_5/N/P in SBR

	试验方案	N充足,P缺少				P充足 N缺少	同步缺 N和 P			
	BOD_5/N/P	100/5/0.8	100/5/0.6	100/5/0.4	100/5/0.31	100/0.94/1	100/4/0.8	100/3/0.6	100/2/0.4	100/0.94/0.31
膨胀前	污泥颜色,形状	白色,大块絮体	白色,块状絮体	白色,针状絮体	白色,细泥	黄色,大块絮体	淡黄均一,球形颗粒	淡黄色,球形颗粒	黄色,规则大颗粒	土黄色,细碎
	出水	清澈	清澈	清澈	清澈	出水混浊	清澈	清澈	清澈	清澈
污泥膨胀	膨胀类型	无	非丝状菌	非丝状菌	非丝状菌	非丝状菌	无	丝状菌	丝状菌	丝状菌
	丝状菌丰盛度[1)]	+级	±级	±级	±级	±级	+级	+++级	+++级	+++级
	污泥颜色,形状	—	粉色,细碎	白色,细碎,松散	白色,大小形状不规则	白色细碎絮体	—	白色,大小不均颗粒	白色,蓬松絮体	白色,米粒状颗粒
	出水	—	较清澈	混浊	混浊	混浊	—	较清澈	清澈	混浊
	出水 COD	54~131	58~150	95~185	94~290	231~389	70~141	41~125	62~150	170~256
	出水 TN	1.5~3.47	0.78~2.69	7.29~8.6	9.05~9.73	1.23~2.02	1.5~3.36	0.9~1.88	0.74~2.41	0.207~0.981
	出水 TP	0.09~0.39	0.095~0.3	0.05~0.20	0.03~0.05	2.56~2.89	0.17~0.56	0.04~0.23	0.08~0.23	0.016~0.037
	最高 SVI	100	276	535	290	495	77	464	330	220
运行周期		84	114	60	109	50	85	123	107	110

1) 0 级:污泥中几乎无丝状菌存在;±级:污泥中存在少量丝状菌;+级:存在中等数量的丝状菌,但总量尚少于菌胶团细菌;++级:存在大量丝状细菌,总量与菌胶团细菌大致相等;+++级:污泥絮粒以丝状细菌为骨架,数量超过菌胶团细菌

当进水中 TN 和 TP 同步缺少 20 %的情况下,也就是 BOD_5/ N/ P = 100/ 4/ 0.8 时,运行了长达 85 周期,没有发生污泥膨胀,SVI 值始终保持在 80 mL/ g 以下.由图 2 可见,该水质条件下污泥的沉降性能与进水中 N、P 营养物质充足时相近.观察污泥性状,污泥为淡黄色、大小均一直径约为 3 mm 的球形颗粒,沉降性能良好,上清液清澈.镜检观察发现污泥中存在中等数量(+ 级)的丝状菌,成为絮体的骨架,菌胶团细菌附着在其上生长,这是正常活性污泥的特性.该条件下 COD 去除率较高,在 80 %以上.

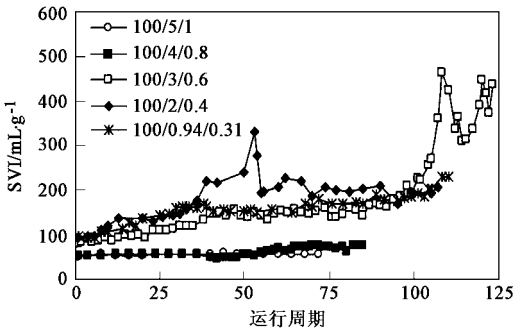

图 2 N、P 同步缺乏对污泥沉降性能的影响

Fig.2 Effect of N and P synchronal deficiency in influent on sludge settling property

当 BOD_5/ N/ P = 100/ 3/ 0.6 时,运行初期 SVI 值上升缓慢,第 40 周期达到 148 mL/ g;第 102 周期开始大幅度增加,仅 6 个周期就增长到 464 mL/ g,随后一直保持在 300 mL/ g 以上.膨胀的污泥由淡黄色球形颗粒变为白色、大小不均匀的直径 2 mm ~ 6 mm 的球形颗粒.当 SVI 值超过 300 mL/ g 后,上清液中漂有蓬松的污泥絮体.进行沉降试验时,发现沉降界面模糊不清.这是因为污泥中絮粒大小差异悬殊所致,大的絮粒迅速下降,细小絮粒沉速慢,形成一个非连续层.镜检观察发现丝状菌特别多(+ + + 级),占了绝对优势,短杆菌相对较少.出水 COD 浓度没膨胀之前在 100 mg/ L 上下变动;污泥膨胀后当 SVI 值在 150 mg/ L 到 200 mg/ L 之间变动时,出水 COD 相对较低,去除率可达到 90 %以上;当 SVI 值超过 300 mL/ g 后,出水 COD 浓度升高.

BOD_5/ N/ P 为 100/ 2/ 0.4 和 100/ 0.94 / 0.31 情况下运行时,运行初期 SVI 上升的速度相差不多,分别在第 32 和 30 周期 SVI 值达到 150 mL/ g.如图 2 所示,在 34 周期之前这 2 种情况下的 SVI 曲线几乎重合.尔后,两者的 SVI 值有较大差别,前者 SVI 值从第 39 周期大幅度上升,最高达到 330 mL/ g;然后,又逐渐降低到 220 mL/ g,此后基本在该值上下波动.而后者的 SVI 值则是逐步缓慢上升至最大值 220 mL/ g.

当 BOD_5/ N/ P = 100/ 2/ 0.4 时,膨胀前污泥为黄色球形颗粒;膨胀后的污泥颜色发白,形成如棉花似的蓬松絮体,沉降性差;混合液难过滤;上清液虽然清澈但有细小的污泥碎片.镜检观察,丝状菌很多(+ + + 级),交织缠绕,假分支.COD 去除率先降低,第 50 周期后又逐步上升至 80 %以上.

当 BOD_5/ N/ P = 100/ 0.94/ 0.31 时,膨胀的污泥呈苍白色,形成规则的米粒状直径约为 2 mm ~ 4 mm 颗粒,颗粒外有胶状透明物质,出水混浊.镜检观察发现丝状菌占绝对优势(+ + + 级),有分支,直且长.COD 去除率较低,在 60 %左右.

由此可见,当 BOD_5/ N/ P 为 100/ 3/ 0.6、100/ 2/ 0.4、100/ 0.94/ 0.31 时,发生了不同程度的丝状菌污泥膨胀.P 是微生物新陈代谢过程中组成核酸、磷酸和辅酶的重要成分;N 是活性污泥微生物的蛋白质、氨基酸的重要成分.当进水中 N、P 的含量缺乏时,丝状菌开始与菌胶团细菌竞争生长,因耐低营养的丝状菌对营养物质有较强的亲和力、吸收率,比表面积大,故在竞争中逐渐占优势地位.丝状菌过量生长,从絮粒中向外到处伸展,组成"刺毛球"状的活性污泥骨架.这些伸向絮粒外部的无数"触手"阻碍了絮粒间的压缩,使絮体发展成含大量内部孔隙的、扩散的、敞开式絮体结构[5].污泥絮体的这种结构使其沉降性变差、SV %值升高,导致污泥膨胀.

虽然发生了污泥膨胀,但当膨胀不严重 SVI 在 300 mL/ g 以下时,处理后出水的 COD 去除率仍然较高,甚至出水 SS 比未发生膨胀时还低.这主要因为:一方面由于丝状菌菌丝的牵连交织形成致密网状污泥层,沉淀时对上清液起到进一步过滤作用,捕捉水中细小的悬浮颗粒,并吸附截留水中的游离细菌;另一方面丝状菌自身具有较高的降解低浓度有机物的能力[6].当 SVI 值过高,超过 300 mL/ g 时,丝状菌生长旺盛,部分菌丝脱离污泥絮体的束缚,使沉淀后上清液中飘有丝缕状污泥絮体,致使出水 COD 升高.另外,在 BOD_5/ N/ P = 100/ 0.94/ 0.31 这种营养物质极度缺乏的情况下,不但菌胶团细菌的活性受到抑制,丝状菌的生长也受到强烈的抑制,代谢能力下降,导致出水 COD 值升高.

2.2 缺乏 N 或 P 对污泥沉降性能的影响

工业废水中往往是 N、P 2 种主要营养元素 1 种缺乏、1 种充足[7].因此,本文针对该情况进行了研

究.即 BOD_5/N/P 为 100/5/0.8、100/5/0.6、100/5/0.4、100/5/0.31、100/0.94/1(由于 N 缺乏引起的污泥膨胀在其它文献中已有介绍[8],在此主要研究 N 极度缺乏的特殊情况).另外,在同样条件下同步做了一组 N、P 营养充足,即 BOD_5/N/P 为100/5/1的情况作为对照试验.试验结果如图 3 所示.

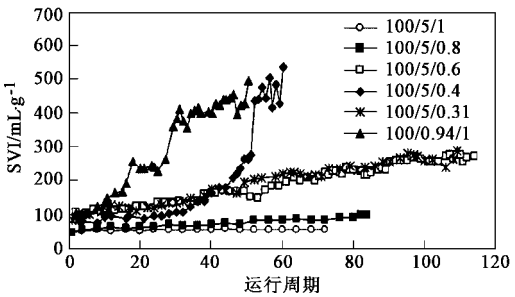

图 3　N或 P缺乏对污泥沉降性能的影响

Fig.3　Effect of N or P deficiency in influent on sludge settling property

当 BOD_5/N/P 为 100/5/0.8 时,其 SVI 值虽然比 N、P 充足条件下(BOD_5/N/P=100/5/1)略高,但在 85 个运行周期中,SVI 值始终在 150 mL/g 以下.COD 去除率在 80 %以上.污泥呈白色的大块絮体,沉降速度快,上清液清澈.

BOD_5/N/P 为 100/5/0.6 和 100/5/0.31 的 SVI 变化情况很相近,分别在第 38 和 35 周期发生了污泥膨胀,SVI 上升到 150 mL/g.在其后的 70 多周期里,污泥指数继续上升,最大值分别达到 276 mL/g 和 290 mL/g.但 COD 去除率却有较大差别,前者的 COD 去除率始终在 80 %以上;后者降到了 70 %以下.前者膨胀后污泥为肉粉色粘性絮体.镜检观察发现,膨胀初始丝状菌(+级)成簇聚集且弯曲、扭曲、卷缩,分布不均匀.随后丝状菌逐渐减少,直至只剩短小的一、两根(±级).后者膨胀后的污泥为白色、松散絮体.污泥有粘性,出水混浊.丝状菌很少(±级),为无分支的游离单根短小菌体或多根卷缩成团,杆状细菌特别多.

当 BOD_5/N/P 为 100/5/0.4 时,经过 40 周期发生污泥膨胀.第 52 周期 SVI 值突然大幅度升高,从 278 mL/g 上升至 437 mL/g,此后 SVI 值在 450 mL/g 左右变化,最大时为 535 mL/g(污泥出现负增长,MLSS 减小至约 1500 mg/L),发生了严重的污泥膨胀.出水 COD 值也随之升高,尤其在 40 到 50 周期出水达 180 mg/L.该过程中污泥外观形状有较大变化,初期污泥为白色针状絮体,沉降快,上清液清澈;而后为细碎的不规则较大颗粒;当污泥膨胀时,颗粒消失,污泥细碎且有粘性、沉降性变差.混合液难过滤,出水混浊.第 40 周期后,产生大量不易破碎的粘性泡沫.镜检观察,膨胀时丝状菌很少(±级),偶有几根又长又直的菌体,絮体中快速运动的小杆菌占了绝对优势.

在缺 N 严重的情况下(BOD_5/N/P=100/0.94/1),仅 12 周期污泥就发生了膨胀.第 18 周期 SVI 值增至 256 mL/g;第 31 周期增长至 414 mL/g;然后增长至 458 mL/g,最后一周期达到 495 mL/g.出水 COD 值随着污泥的膨胀不断增高,在 SVI 值达到 400 mL/g 以上时,出水的 COD 值高达 380 mg/L,去除率仅为 30 %.膨胀后的污泥为白色絮体,沉降性很差;泥水混合液粘稠,过滤十分困难;上清液混浊.镜检观察,丝状菌很少,只有游离的几根(±级),菌体短小,短杆菌特别多,活性很强.

当进水 BOD_5/N/P 为 100/5/0.6、100/5/0.4、100/5/0.31、100/0.94/1 时,都发生了不同程度的非丝状菌污泥膨胀.其共同特征都是活性污泥中丝状菌很少、污泥的结合水很高、污泥有粘性、沉降性变差、泥水混合液难过滤.这是因为营养物质比例失调时,微生物不能充分利用碳源合成细胞物质,细菌获得的大量碳源物质转变为胞外多聚物,这种多聚物质是高度亲水性化合物,含有大量结合水,影响污泥的沉降性能;N、P 比例失调也可使丝状菌生长受到抑制,丝体卷缩、断裂、缩短,失去形成污泥絮体的骨架作用,造成絮体松散;另外,由于处于缺乏营养物质的恶劣环境中,微生物也可能分泌一些粘性物质将自身包裹而保护起来,这些分泌物也能结合大量的水分,使污泥沉降性变差.

2.3　膨胀污泥的恢复和控制

上述污泥膨胀都是由于营养物质缺乏而引起的,因此本研究中在其它条件不变的情况下,采用在进水中补充足够营养元素的方法,对膨胀污泥进行恢复和控制.

由图 4 可见,在大多数情况下,当补充了足够的营养物质,运行一定周期后,无论是丝状菌膨胀,还是非丝状菌膨胀,污泥指数都会下降,污泥沉降性能变好.

图 5 比较了不同进水情况下污泥的膨胀速率和恢复速率(膨胀速率的定义为:污泥膨胀过程中,运行初始 SVI 值持续上升至 150 mL/g 的这一阶段中,平均每周期上升的 SVI 值;恢复速率为:膨胀污泥恢复过程起点的 SVI 值持续下降至 150 mL/g 这一

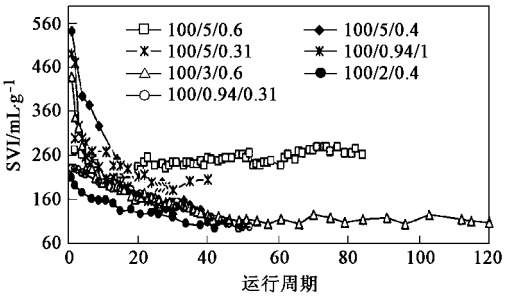

图 4 添加足够营养元素对污泥膨胀的控制

Fig.4 Control of bulking by adding enough nutrients

阶段中,平均每周期下降的 SVI 值.).其中在 P 充足、N 严重缺乏,即 BOD_5/N/P 为 100/0.94/1 的情况下,其膨胀速率和恢复速率都最大.在 N 充足,P 缺乏的情况下,当 BOD_5/N/P 为 100/5/0.4 时,膨胀得最快,添加足够的营养物质后,其恢复得也最快.在 N 和 P 同时缺乏的情况下,营养元素缺乏越严重,其膨胀速率就越快;补充足够的营养物质后,恢复得越慢.

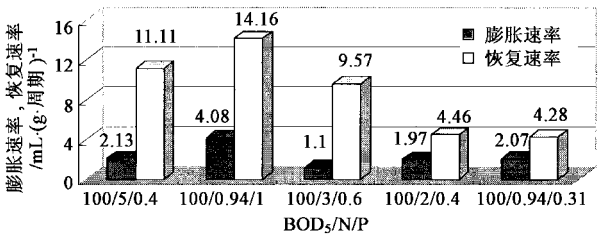

图 5 营养元素不同缺乏程度下引起污泥膨胀的膨胀速率与恢复速率

Fig.5 Bulking rate and recovery rate at the different influent BOD_5/N/P

当原水 BOD_5/N/P 为 100/5/0.6 时,虽然补充了足够的 P,但运行了 84 周期后,SVI 值仍为 270 mL/g.因此把该膨胀污泥分为 3 份,补充足够的营养元素的同时又分别将负荷由原来的 4.01 kg/(kg·d)提高到 9.13kg/(kg·d)、12.10 kg/(kg·d)、15.51 kg/(kg·d),分别运行了 45、36、30 周期后,膨胀污泥得到控制,污泥指数降低至 150 mL/g(见图 6).其恢复速率分别为 2.18、3.5、4.0 mL/(g·周期).由此可见,随着污泥负荷的提高,污泥恢复速率也提高.在原水 BOD_5/N/P 为 100/5/0.3 条件下发生的污泥膨胀,当仅仅补充足够 P 元素后,膨胀也无法控制,提高有机负荷到 9.5kg/(kg·d),膨胀现象才得以控制.

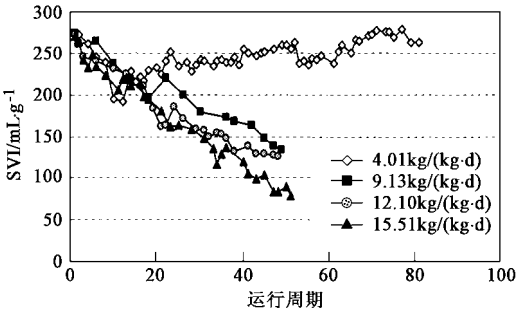

图 6 进水 BOD_5/N/P 为 100/5/0.6 条件下引发的膨胀污泥在不同有机负荷下恢复情况

Fig.6 Control of bulking at different organic load rate that occurred at the influent BOD_5/N/P of 100/5/0.6

3 结论

(1)当进水 BOD_5/N/P 为 100/5/1、100/5/0.8 和 100/4/0.8 时,污泥沉降性能良好,没发生污泥膨胀,COD 去除率较高.

(2)当进水中 N、P 营养物质同时缺乏,即 BOD_5/N/P 为 100/0.94/0.31、100/2/0.4、100/3/0.6 时发生了丝状菌污泥膨胀.SVI 在 300 mL/g 以下时,后 2 种情况的 COD 去除率仍然较高,污泥沉淀后上清液清澈,出水悬浮物浓度未检出.进水 N、P 同时缺少情况下的活性污泥多为密实的粒径在 2 mm 至 6 mm 之间不等的球形颗粒污泥.

(3)当进水中 N 或 P 缺乏,即 BOD_5/N/P 为 100/0.94/1、100/5/0.31、100/5/0.4、100/5/0.6 时发生了非丝状菌污泥膨胀,污泥有粘性,泥水混合液难过滤.

(4)多数情况下营养物质缺乏引起的污泥膨胀可通过添加足够营养物质来恢复和控制.适当提高有机负荷有助于控制 N、P 缺乏引起的污泥膨胀.

参考文献:

[1] 陈冰照,林梅.烤鳗废水活性污泥法处理中污泥膨胀的原因及控制[J].福建环境,2001,**18**(6):18~19.

[2] 王凯军,秦人伟.发酵工业废水处理[M].北京:化学工业出版社,2000.197~443.

[3] 王凯军.活性污泥膨胀的机理与控制[M].北京:中国环境科学出版社,1992.78.

[4] Kappeler J, Gujer W. Influences of Wastewater Composition and Operating Conditions on Activated Sludge Bulking and Scum Formation[J]. Wat. Sci. Tech., 1994, **30**(11): 181~189.

[5] 龙腾锐,何强,林刚. 活性污泥中丝状菌与絮体结构的关系研究[J]. 中国给水排水,2000, **16**(2):5~8.

[6] 沈耀良,王宝贞. 废水生物处理新技术——理论与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,1999.234~237.

[7] 周雪飞,任南琪. 低有机负荷含磷废水处理中污泥膨胀的控制对策[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2001,**34**(4):58~60.

[8] 高春娣,彭永臻,王淑莹,陈滢.氮缺乏引起的非丝状菌活性污泥膨胀[J].环境科学,2001,**22**(6):61~65.