

分段进水生物接触氧化工艺处理河道污水的试验研究

李璐, 温东辉*, 张辉, 谢曙光

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 选择滇池入湖污染负荷最高的大清河为对象, 以分段进水生物接触氧化(SFBC)工艺对河道污水开展了分流处理的试验研究, 已完成冬季枯水期、春季枯水期及夏季丰水期 3 个时期的研究. 结果表明, SFBC 工艺对水质变化具有很好的适应性, 调整各时期的运行参数, 可以使 COD 及 TP 的去除率分别稳定在 50% 和 40% 左右, 但 TN 的去除受水温及溶解氧等的影响很大, 在逐渐稳定后去除率可达到 20% 左右. 接种活性污泥可以加快装置的启动, 但总体去除效果不及来水自然驯化的污泥, 随着运行时间延长以及来水带入河道底泥的影响, 有无接种污泥在处理效率上的差别逐渐消失.

关键词: 分段进水生物接触氧化(SFBC)工艺; 河道污水; 去除率; 氮转化; 滇池

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2227-08

Pilot Experiment on the Treatment of the River Wastewater by a Step-Feed Biological Contact Process

LI Lu, WEN Dong-hui, ZHANG Hui, XIE Shu-guang

(College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In the Dianchi Lake watershed, the Daqinghe River with the highest load of pollution was chosen as the treatment target, a new step-feed biological contact (SFBC) process was studied to treat the wastewater from the riverway. The pilot experiment was carried out through a winter dry season, a spring dry season and a summer rainy season. The results showed that the SFBC process was well-adapted to the variation of the river wastewater qualities. By adjusting the process parameters in different seasons, the removal rates of COD and TP could be stable at about 50% and 40% respectively; however, the removal rate of TN was influenced by the water temperature and DO greatly, and kept at about 20% when the process went to its stabilization. Seeding with activated sludge could accelerate the start-up of the equipment, but the whole treatment efficiency was not as good as that of the equipment without seeding but domesticating the microorganism in the river wastewater. However, along with the running of the SFBC process as well as the impact of the influent sediment from the river, the difference of the treatment efficiencies between the two equipments of whether or not seeding with activated sludge would disappear gradually.

Key words: step-feed biological contact (SFBC) process; river wastewater; removal rate; nitrogen transformation; the Dianchi Lake

我国工业化与城市化的快速进程使大量河流、湖泊等淡水体系受到不同程度的污染, 水体中有机污染物、氮、磷等营养物质不断增加, 导致湖泊发生严重的富营养化现象, 太湖、巢湖、滇池等湖泊的水华暴发造成的城市饮用水危机已成为日益突出的环境问题, 其中滇池湖体总体为劣 V 类水质, 富营养化现象严重, 环湖河流也为重度污染^[1]. 为了控制湖泊的富营养化, 削减入湖河流的污染负荷成为一项关键措施.

在自然条件下, 河流的河岸带对汇入的径流水具有生态缓冲作用^[2,3]. 但是我国人口众多、耕地面积少, 历史上多次围滩造田, 使得我国大多数江河两岸基本上没有了自然的河岸带区, 径流水在流入河网水系的过程中所受自然净化和缓冲作用较小, 致使污染逐级汇入江河. 将污染河水分流出来就地处理后再返回河道, 相当于起到了“人工强化河岸带”作用. 经济可靠的污水处理工艺均可被用于河流的分流处理, 如自然生态型的人工湿地处理系统^[4~7]、

氧化塘^[8], 以及人工强化型的悬浮载体生物移动床^[9,10]、生物固定床^[11,12]. 在实际应用中, 还可以将各种技术进行改型^[13]和改造^[14], 以达到高效低耗地净化河水的目的. 上述工艺系统均可有效去除有机物, 对削减氮、磷营养物质也有一定效果. 随着各国对污水脱氮除氮的要求提高, 更多适用的脱氮、除磷新工艺将被应用于河道污水治理中.

分段进水生物处理 (step-feed biological treatment) 工艺具有处理效率高、基建投资和运行费用少、运行管理方便、脱氮效率高等特点. 纽约市水污染控制厂的 1 个 94 600 m³/d 的 4 段进水生物脱氮工艺, 在进水 COD 158 mg/L、NH₄⁺-N 15.7 mg/L、理论 HRT 4.1 h 的条件下, 硝化程度随水温的增加而提高, 终沉池出水氨氮浓度 < 1 mg/L, 反硝化过程受

收稿日期: 2007-08-13; 修订日期: 2007-09-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA601010-03)

作者简介: 李璐(1983~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染治理与生物修复, E-mail: lilu1983@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dhwen@pku.edu.cn

反应时间和可降解碳源不足的限制,历经冬夏 2 季的平均反硝化率在 64%~68% 之间^[15-17].在前人研究基础上,本研究开发一种新型的分段进水生物接触氧化(step-feed biological contact, SFBC)工艺,并以滇池流域的大清河为治理对象,开展河道污水处理的试验研究.大清河是目前滇池流域污染负荷最大的一条河流,它位于滇池北部,沿程受纳了大量城乡污水,并且汇集金汁河、枧槽河、东白沙河等河流的污染,年均流量为 $7.8 \times 10^7 \text{ m}^3$,每年汇入滇池的污染达到 COD 15 274 t、TN 3 792 t、TP 312 t,分别占入湖总污染负荷的 24.5%、26.8%和 20.9%.本研究将为 SFBC 工艺应用于大清河河道污水处理的示范工程提供设计依据与技术参数.

1 材料与方法

1.1 试验装置

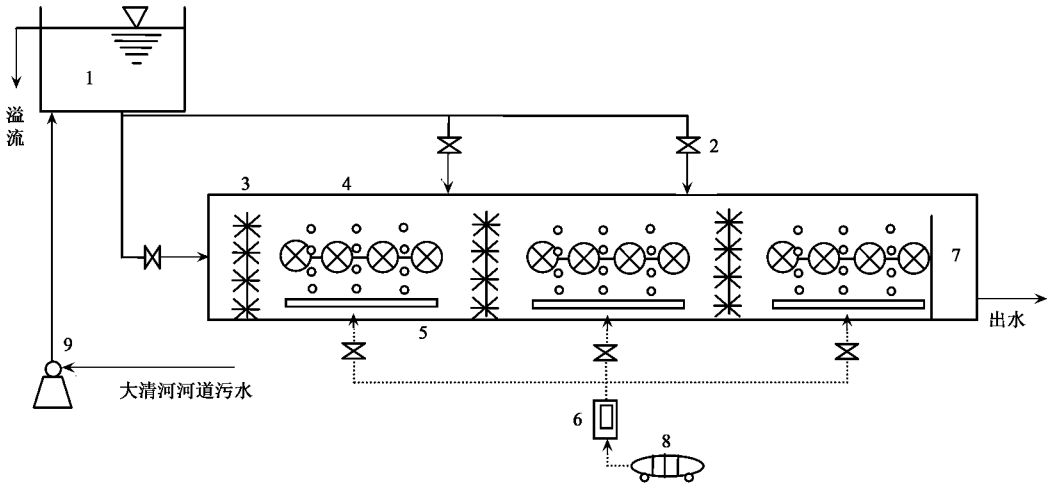
SFBC 工艺流程如图 1 所示.大清河河道污水由水泵压入高位水箱,通过满位溢流控制水位差,经止回阀控制流量进入水槽各段;水槽最终出水经 90°三角堰流入沉淀区再排放出水;空气泵产生的压缩空

气在气体流量计的控制下,在曝气区通过穿孔压力管供气.

主体水槽装置有 2 套,由 PVC 板制成,单槽尺寸为 $1.9 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$,总有效容积为 0.1425 m^3 .2 个槽均采用三段进水形式,每段容积比 1:1:1.为优化水槽内溶解氧的分布,各段内按水流方向设计了容积比为 1:3 的非曝气区与曝气区.非曝气区采用弹性立体填料,曝气区采用组合填料,每个水槽成为一个生物接触氧化工艺的反应器.

1.2 试验水质及条件

试验在大清河现场进行,所用污水直接取自河道,水质状况完全与河道污水一致,取水点上游 1 100 m 处有 1 个截污闸阀,下游 850 m 为河水汇入滇池的入湖口.作为我国严重富营养化的典型湖泊,滇池的入湖河道水体即使在截污闸阀拦截污水时期,营养物控制指标的平均值分别为 COD 166.7 mg/L、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 31.9 mg/L、TP 1.11 mg/L,均超过国家《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准中的出水水质 $\text{COD} \leq 60 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N} \leq 15 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.5 \text{ mg/L}$ 的 1 倍以上.



1. 高位水箱;2. 止回阀;3. 弹性立体填料;4. 组合填料;5. 穿孔压力管;6. 气体流量计;7. 沉淀区;8. 空气泵;9. 水泵

图 1 分段进水生物接触氧化工艺系统的流程

Fig.1 Schematic of the SFBC process

试验装置露天放置,现场气候条件对运行产生直接影响.2 套水槽装置中,1 号槽在启动时接种了昆明市第二污水处理厂的活性污泥,2 号槽在启动时没有特别接种污泥,以河道污水带入的微生物进行自然驯化.2 个水槽其它工艺条件完全一致.

1.3 分析项目及方法

COD:重铬酸钾法;TN:碱性过硫酸钾消解-紫

外分光光度法;TP:钼酸铵分光光度法; $\text{NO}_3^- \text{-N}$:酚二磺酸分光光度法; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$:纳氏试剂分光光度法;DO、pH 及水温: Mettler Toledo DO 测定仪及 pH 测定仪.

2 结果与讨论

大清河水质状况随着气温、降雨量、上游是否开

闸泻污等条件变化而变化,试验装置于 2006 年 12 月启动,已经经历了冬季枯水期、春季枯水期和夏季丰水期.3 个时期的试验条件如表 1 所示(2 个槽条件一致),试验期间的取样时间为每日上午 11:00,图 2 显示了试验期间水槽内的水温 and 溶解氧的变化.3 个时期的 SFBC 工艺处理效果见表 2.

表 1 试验期间的现场气候条件与河道污水状况

Table 1 Local climate and river wastewater conditions during the experiment seasons			
条件	冬季枯水期 (2006-12-19 ~ 2007-01-31)	春季枯水期 (2007-03-03 ~ 2007-05-08)	夏季丰水期 (2007-05-13 ~ 2007-06-14)
气温范围/℃	0 ~ 17	6 ~ 28	10 ~ 28
降雨情况	降水较少,且雨量少,有 1 次小降雪	降水较少,且雨量少	降水频繁,且雨量大
光照情况	光照强烈	光照强烈	阴雨天较多,光照弱,晴天光照强烈
河道水体状况	上游闸阀开启,河道内为生活污水	上游闸阀关闭,河道内为滇池倒灌湖水	上游闸阀在降雨期间开启,河道内为雨水与生活污水混合水,闸阀关闭后又为滇池倒灌湖水
水槽总进水量/L·h ⁻¹	26.4	71.3	26.4
各段进水量比例(体积比)	4:3:2	1:1:1	1:1:1
总 HRT/h	5.4	2	5.4
水温范围/℃	8.5 ~ 14.8	13.9 ~ 24.2	17.9 ~ 32.6
DO 范围/mg·L ⁻¹	0	0.7 ~ 9.8	0.1 ~ 7.6

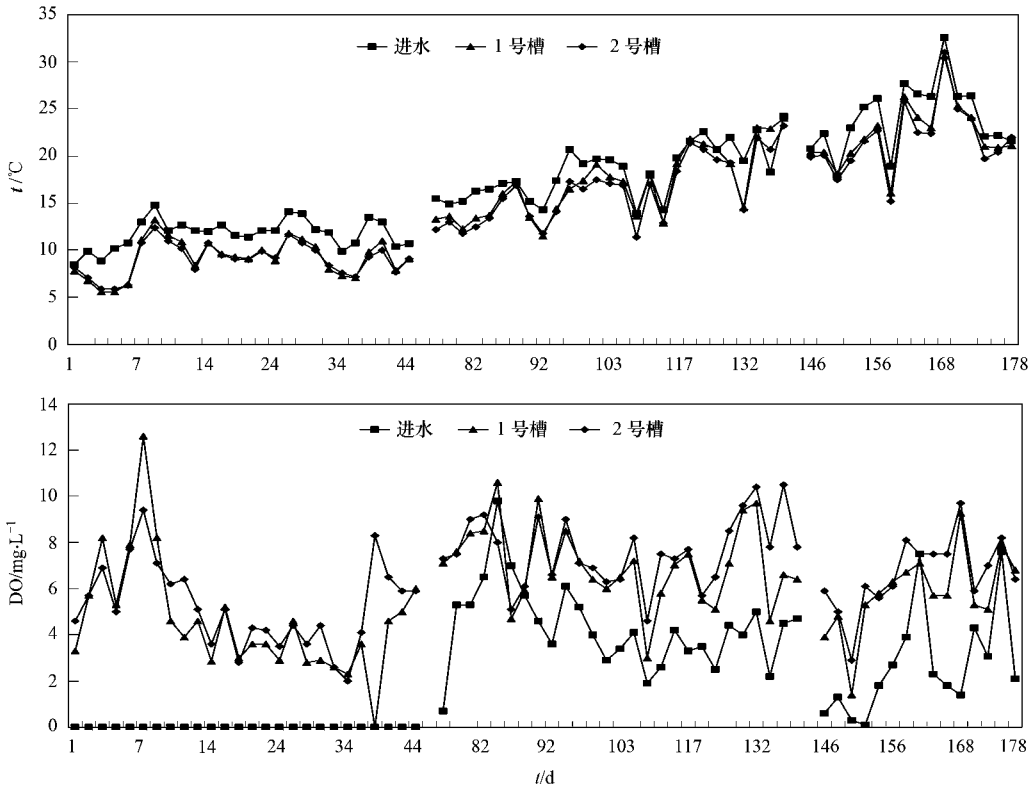


图 2 SFBC 工艺内水温和溶解氧变化

Fig.2 Wastewater temperature, DO in the SFBC process

2.1 冬季枯水期 SFBC 工艺运行状况

冬季枯水期水质相对稳定,来水平均 COD 为 166.7 mg/L,平均 TN 为 34.9 mg/L,平均 TP 为 1.11 mg/L.试验装置处于启动及驯化阶段,同时冬季水温较低,不利于微生物生长,由于光照时间较长,藻的

生长状况良好,使填料表面呈现绿色.显微镜观察各水槽的生物相均比较单一,生物量较低.在此期间,各槽水力停留时间为 5.4 h,各段进水量的体积比为 1:1:1^[18].

2 个槽对污染物的去除情况如图 3 所示.COD

表 2 各时期 SFBC 工艺处理效果比较

		Table 2 Comparison of the treatment efficiency of the SFBC process in different seasons		
参数		冬季枯水期 (2006-12-19 ~ 2007-01-31)	春季枯水期 (2007-03-03 ~ 2007-05-08)	夏季丰水期 (2007-05-13 ~ 2007-06-14)
COD	进水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	114.7 ~ 301.5	48.3 ~ 201.2	48.8 ~ 174.7
	出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	20 ~ 205.8	20.7 ~ 88.7	13.6 ~ 77.3
	去除率/%	28.1 ~ 82.2	23.5 ~ 71.9	21.6 ~ 77.6
TN	进水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	26.31 ~ 37.89	7.83 ~ 19.93	9.45 ~ 18.55
	出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	23.23 ~ 36.52	5.38 ~ 18.37	3.92 ~ 17.67
	去除率/%	0.2 ~ 15.7	2.9 ~ 35	0.2 ~ 67.9
TP	进水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.29 ~ 1.74	0.13 ~ 0.57	0.36 ~ 2.24
	出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.15 ~ 1.4	0.05 ~ 0.3	0.08 ~ 1.86
	去除率/%	16.5 ~ 78.8	15.4 ~ 71.7	16.7 ~ 88.8

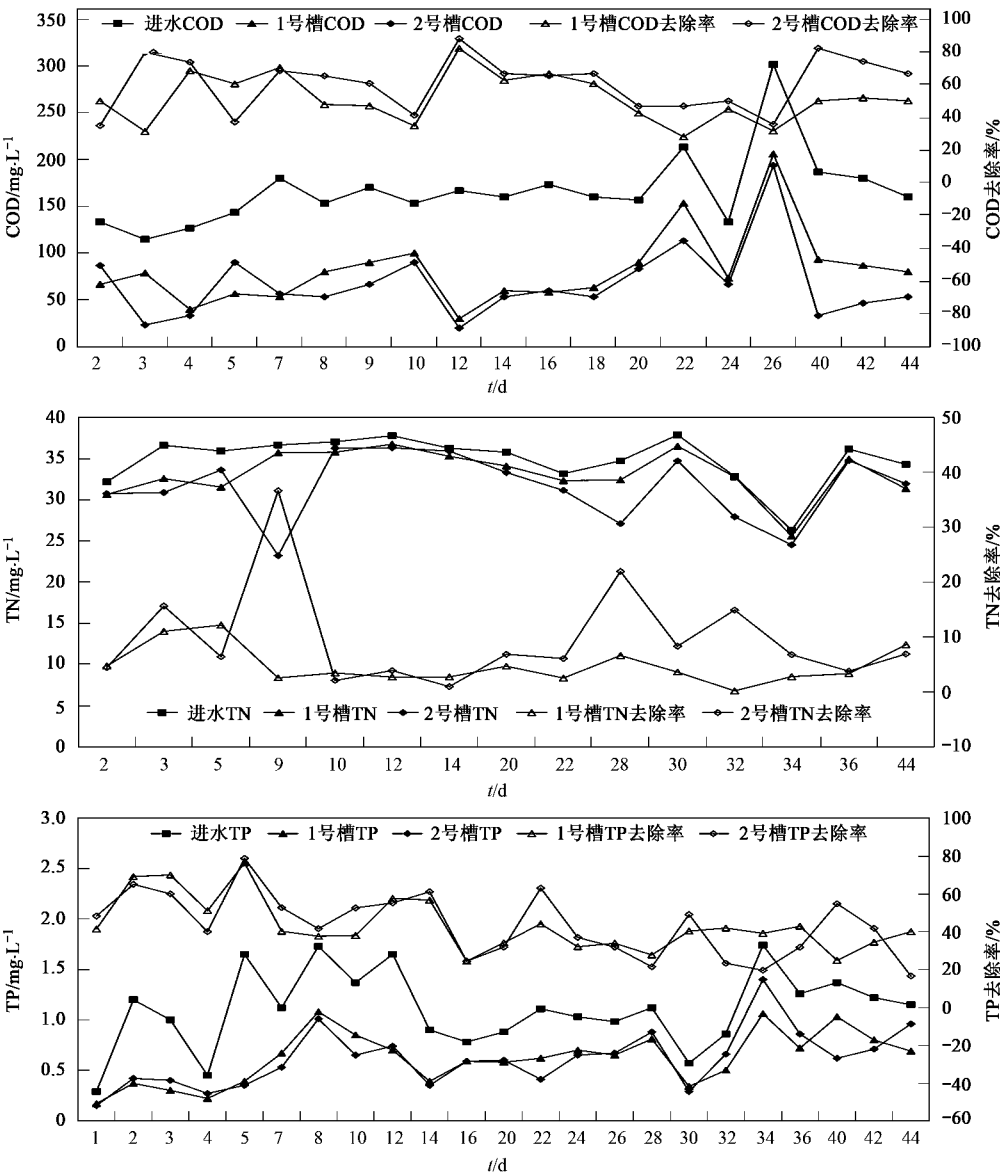


图 3 冬季枯水期 COD、TN 和 TP 的变化及去除率

Fig.3 COD, TN, TP variation and removal rates during the winter dry season

的平均去除率为1号槽51.6%,2号槽60.5%;TP的平均去除率均为43.4%;TN的去除率受温度影响较大,1号槽相对稳定在4.8%左右,2号槽在1%~36.6%波动,平均为9.7%.比较发现,1号槽因接种污泥而使各污染物去除率相对稳定,并加快了启动进程;而2号槽受来水水质和气候因素的影响明显,污染物去除率波动较大,但平均处理效果却优于1号槽.

2.2 春季枯水期 SFBC 工艺运行状况

春季枯水期由于上游截污闸阀没有开启,大清河河道内为滇池倒灌湖水和原河道污水的混合水,水体中平均COD为83.1 mg/L,平均TN为13.0 mg/L,平均TP为0.37 mg/L.在此水质状况下以HRT为5.4 h运行,生物膜生长出现异常,生物膜易脱

落,膜厚变薄,并且由于日光作用,来水水华较多.增大试验装置的处理负荷,调整HRT为2 h,各级进水量的体积比为4:3:2^[18],生物膜生长恢复正常,此期间藻菌共生现象逐渐明显,显微镜观察显示各水槽内生物相逐渐丰富,出现多种不同的藻类及指示生物.

两槽对污染物的去除情况如图4所示.春季由于进水的有机负荷降低,在调整水力停留时间以前,1、2号槽的COD去除率均低于50%,平均为38.5%左右;调整负荷以后,COD的去除率提升至50%左右,其中1号槽平均为54.2%,2号槽平均为46.4%.温度的升高使得TN的去除率明显上升,1号槽的去除率平均为15.5%,2号槽平均为24.7%.TP的去除率波动较大,1号槽的去除率平均为

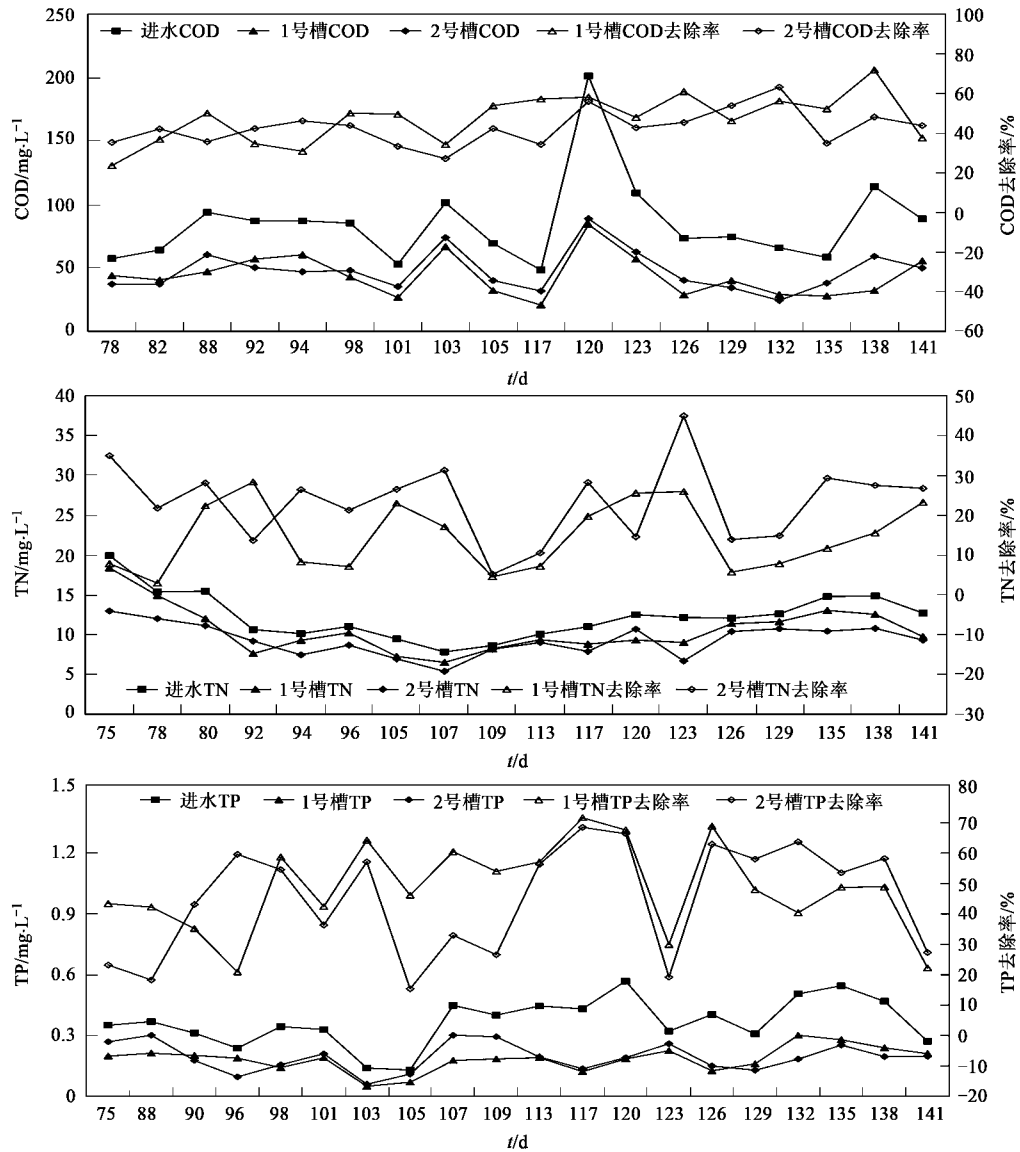


图4 春季枯水期 COD、TN 和 TP 的变化及去除率

Fig.4 COD, TN, TP variation and removal rates during the spring dry season

48.6%, 2 号槽平均为 45.1%。比较发现, 在此期间 1 号槽的 COD 及 TP 的去除率都略高于 2 号槽, 但 TN 的去除率则是 2 号槽更好。

2.3 夏季丰水期 SFBC 工艺运行状况

夏季丰水期由于泄洪的必要, 上游截污闸会在降雨期间不定期地开启, 大清河河道内为上游雨水与生活污水的混合水, 并且流量大, 水质变化很快, 对处理系统冲击很大, 期间带来大量底泥进入水槽, 会在已生长的生物膜上覆盖上一层河道底泥。同时由于夏季的到来, 在不降雨期间光照时间变长, 随污水进入水槽的浮萍在非曝气区形成遮盖效果, 曝气区的表层水藻与填料生长缠绕在一起, 逐渐布满

整个水槽, 更为生物膜生长提供了载体, 系统耐冲击性提高, 由于带入大量暴发水华, 在曝气系统作用下, 水体变绿, 显微镜观察显示各水槽内生物相更加复杂, 出现钟虫、轮虫及水蚤等生物, 并且投加小鱼及虾也可成活。此间由于系统来水冲击较大, 水槽以设计停留时间 5.4 h 运行, 各级进水流量的体积比为 4:3:2^[18]。

两槽对污染物的去除情况如图 5 所示。雨季由于降雨较多, 且降雨期间温度较低, 进水 COD 浓度除了开闸泄污期都有所下降, 平均为 78.4 mg/L, 两槽 COD 去除率也相应下降, 1 号槽在闭闸期间平均去除率为 40.7%, 2 号槽为 43.1%; 开闸期间随着来

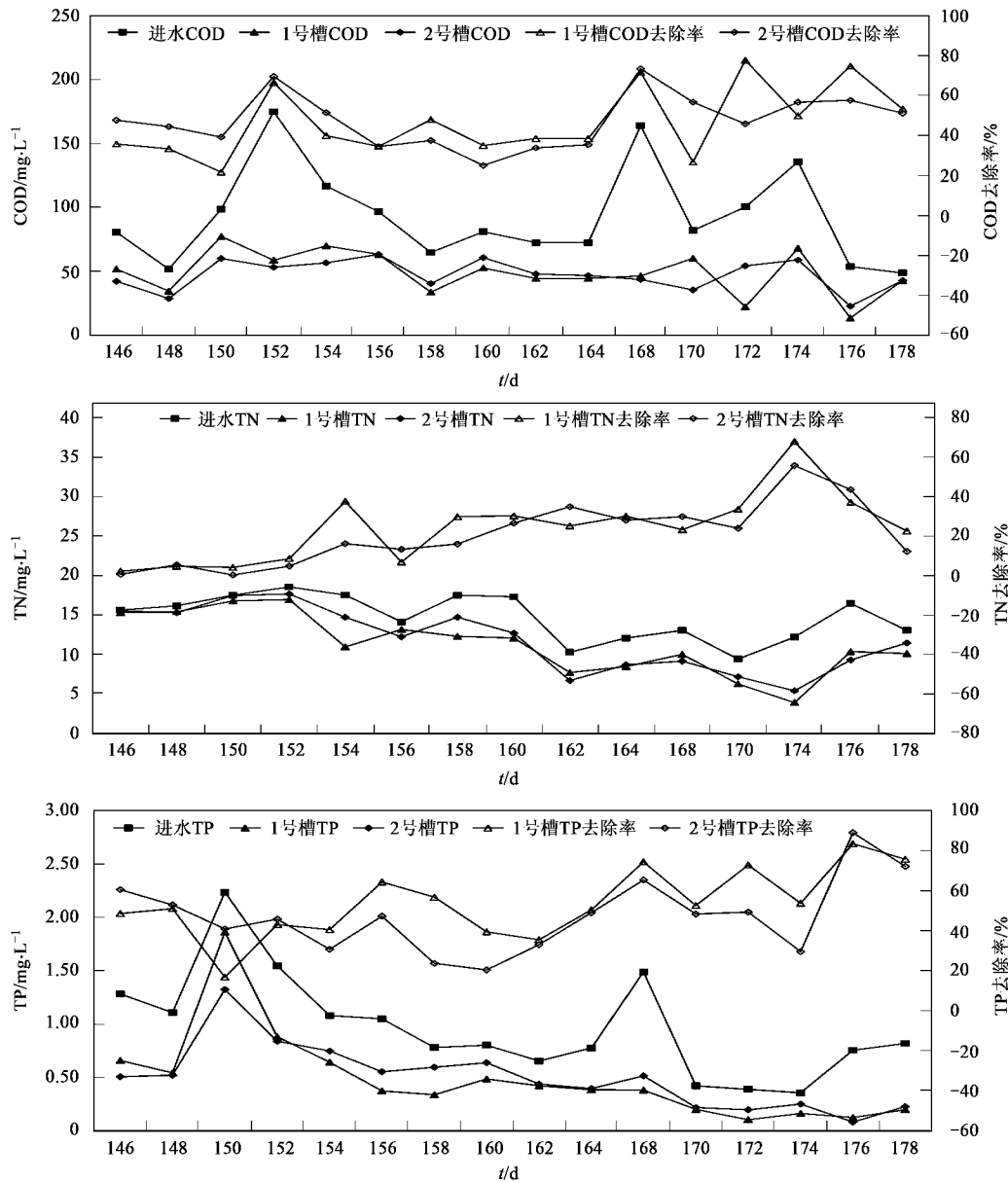


图 5 夏季丰水期 COD、TN、TP 的变化及去除率

Fig.5 COD, TN, TP variation and removal rates during the summer rainy season

水 COD 浓度的提高,两槽 COD 去除率也相应升高,平均去除率分别为 71.9% 和 66.5% .TN 的去除率受水温和降雨期间的底泥冲击影响也相应下降,但逐渐得以恢复,1、2 号槽的平均去除率从 4.9% 和 2.7% 恢复到 31.2% 和 27.2% .TP 的去除率受降雨影响不大,但依旧波动较大,1 号槽在 16.7% ~ 83.3% 之间波动,平均去除率为 53.6%; 2 号水槽在 20.4% ~ 88.8% 之间波动,平均去除率为 47.3% .比较发现,由于系统运行期延长以及河道上游多次开闸泻污所带来的底泥影响,1、2 号水槽在此期间的各污染去除情况已趋近相同,启动期有无接种污泥的影响基本可以忽略.

2.4 SFBC 工艺中氮的转化

在 SFBC 工艺运行期间,氨氮和硝氮的变化如图 6 所示.

氨氮转化受温度的影响很大.由图 2 显示的 SFBC 系统运行期间的水温变化,冬季整体水温没有超过 15℃,此时生物硝化作用受到较大抑制,进水的高浓度氨氮几乎没有去除,硝氮生成量很少(图 6),脱氮效率较低,2 槽 TN 平均去除率仅为 4.8% 和 9.7%(图 3).待春季和夏季温度上升,微生物反应活性增强,生物硝化作用得到恢复和增强,进水氨氮

的去除率提高(图 6),硝氮生成量增加(图 6),2 槽 TN 平均去除率分别提升到春季的 15.5% 和 24.7% (图 4)以及夏季的 31.2% 和 27.2%(图 5).

氨氮转化还与溶解氧浓度有关.由图 2 显示的 SFBC 系统运行期间的 DO 变化,在冬季由于上游污水的连续排放,来水 DO 为 0 mg/L,经曝气及藻类光合作用水槽内 DO 浓度达到 2 mg/L 以上,但此时低温的不利影响占主导,使得硝化和反硝化作用均被严重抑制(图 6、图 3).至春季和夏季,上游闸阀只有不定期开启,同时河道内安装了曝气装置,伴随水中藻类的光合作用,水槽进水的 DO 明显提高,为 0.1 ~ 9.8 mg/L,甚至短期内水槽内可不需曝气;此时过高的 DO 使硝化作用强烈(图 3),氨氮的去除率很高(图 6),但是反硝化作用受到一定影响,一般认为在活性污泥系统中,使反硝化停止进行的 DO 浓度为 1.5 mg/L^[19],由于 SFBC 工艺中生物膜比重较大,在外界高溶解氧的环境中,生物膜内部仍会发生一定程度的反硝化,同时水温的大幅度提高也促进了反硝化速度,因而春、夏季时期系统 TN 的去除率较冬季还是有很大提高(图 4、图 5).

对比 1、2 号水槽,2 号槽由于完全以河道污水中的土著微生物驯化而挂膜,生物膜对水质变化的

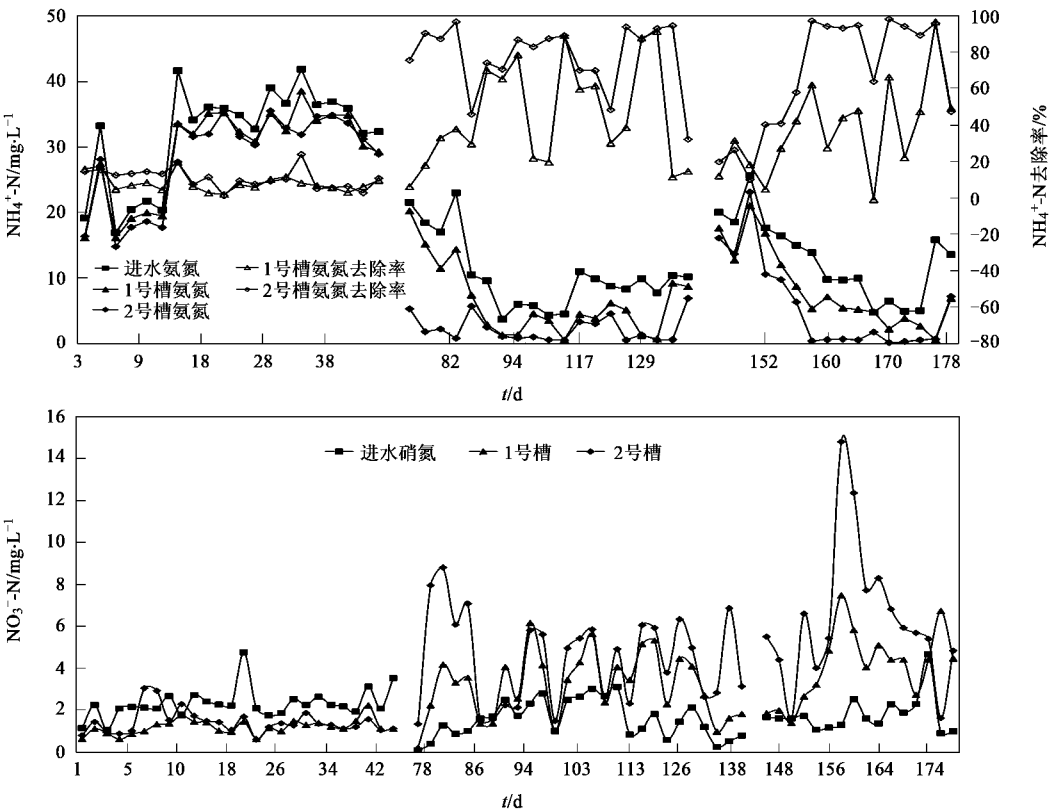


图 6 试验期间氨氮和硝氮的变化

Fig.6 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N variation during the experiment seasons

适应能力更强,但是在冬季低温条件下,两槽的氮转化区别不大;在春季水质相对稳定的情况下,2号槽在氨氮去除和硝氮生成方面均优于1号槽,同时2号槽也早于1号槽出现大量的水藻;至夏季随着运行时间延长以及来水带入的河道底泥的影响,1、2号水槽的区别也逐渐微乎其微了。

3 结论

(1)在系统启动阶段,接种污泥可以加快 SFBC 工艺的挂膜进程,在装置运行早期出水水质也相对稳定;不接种污泥而以来水中的微生物自然驯化挂膜的 SFBC 工艺系统,在装置运行早期出水水质随外界条件的变化而波动很大,但生物膜形成的优势菌群更能适应水质状况,出水各项指标的平均值均更优;最后,随着长期运转以及来水带入的河道底泥的影响,有否接种污泥的处理效果差别趋近于无。

(2)通过调整 SFBC 工艺的分段进水比例、HRT、曝气强度等参数,可以适应不同季节滇池入湖河道污水的气候与水质的变化,COD 及 TP 的去除率能够稳定在 50% 和 40% 左右;脱氮率受来水温度和 DO 的影响较大,硝化作用在冬季枯水期很弱,TN 的去除率低于 5%,春季和夏季随着温度上升和 DO 提高,硝化作用得到恢复和强化,反硝化作用亦有一定提高,TN 的去除率逐渐维持在 20% 左右。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局.2006 中国环境状况公报[R]. <http://www.sepa.gov.cn/zxbd/sjhjr/2007hjr/tpbd56/200706/P020070605323023573963.pdf>
- [2] Naiman R J, Decamps H. The ecology of interfaces: riparian zones[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, **28**: 621-658.
- [3] Anbumozhi V, Radhakrishnan J, Yamaji E. Impact of riparian buffer zones on water quality[J]. *Ecological Engineering*, 2005, **24**(5): 517~523.
- [4] de Ceballos B, Oliveira H, Meira C, *et al.* River water quality improvement by natural and constructed wetland systems in the

- tropical semi-arid region of Northeastern Brazil[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44** (11-12):599-605.
- [5] Jing S R, Lin Y F, Lee D Y, *et al.* Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2001, **76**(2):131-135.
- [6] Ruan X, Xue Y, Wu J, *et al.* Treatment of polluted river water using pilot-scale constructed wetlands[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **76**:90-97.
- [7] 张建,邵文生,何苗,等. 人工湿地处理污染河水的持续性运行研究[J]. *环境科学*, 2006,**27**(9):1760-1764.
- [8] 江栋,李开明,刘军,等. 黑臭河道生物修复中氧化塘应用研究[J]. *生态环境*,2005, **14**(6):822-826.
- [9] 王学江,夏四清,张全兴,等. 悬浮填料移动床处理苏州河支流河水试验研究[J]. *环境污染治理技术与设备*,2002, **3** (1):27-30.
- [10] 王荣昌,文湘华,景永强,等. 悬浮载体生物膜水槽修复受污染河水试验研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**, (增刊), 67-69.
- [11] 林岩清,何苗,胡洪营,等. 渗流式生物床处理受污染河水的中试[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(3):8-11.
- [12] Park Y S, Moon J H, Kim D S, *et al.* Treatment of a polluted stream by a fixed-bed biofilm reactor with sludge discharger and backwashing system[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, **99**: 265-271.
- [13] 周训华. 适用于河流治理的地面廊道污水处理系统的设计[J]. *水电站设计*, 2004, **20**(3):44-46.
- [14] Boonsook P, Luanmanee S, Attanandana T, *et al.* A comparative study of permeable layer materials and aeration regime on efficiency of multi-soil-layering system for domestic wastewater treatment in Thailand[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, **49**(6): 873-882.
- [15] 邱慎初,丁堂堂. 分段进水的生物除磷脱氮工艺[J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(4):32-36.
- [16] Gorgun E, Artan N, Orhon D, *et al.* Evaluation of nitrogen removal of the step feeding in large treatment plants[J]. *Water Science & Technology*, 1996, **34**(1P2):253-260.
- [17] Fillos J, Diyamandoglu V, Carrio L, *et al.* Full-scale evaluation of biological nitrogen removal in the step-feed activated sludge process [J]. *Water Environmental Research*, 1996, **68**:132-142.
- [18] 祝贵兵,彭玉臻,周利,等. 优化分段进水生物脱氮工艺设计参数[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(9):62-64.
- [19] 郑兴灿,李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998. 51.