

高效藻类塘处理农村生活污水研究

黄翔峰, 池金萍, 何少林, 李旭东, 杨殿海, 周琪
(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对高效藻类塘处理太湖地区农村生活污水的效果进行了研究。结果表明, 太湖地区农村生活污水的水质受季节影响变化较大, 秋、冬季的有机物浓度较夏季高 3~4 倍; 高效藻类塘内存在的菌藻共生体系使塘内溶解氧浓度较高(保持好氧状态), 而 pH 值则存在周期性变化; 对 COD 的平均去除率可达 70%, 氨氮主要通过硝化作用去除, 去除率 > 90%, 磷酸盐主要通过沉淀作用去除, 去除率为 50%。系统运行效果受季节性光照和温度变化影响很大, 夏季停留时间需 4 d, 冬季需 8 d。较高流速可强化系统的传质效果, 提高了对污染物的去除能力。塘深较浅时, 塘深对处理效果影响不大。高效藻类塘系统能较好地净化太湖地区的农村生活污水。

关键词: 高效藻类塘; 农村生活污水; 太湖; 脱氮除磷

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2006)05-0035-05

Treatment of Domestic Wastewater with High-rate Algal Pond in Rural Areas

HUANG Xiang-feng CHI Jin-ping HE Shao-lin LIXu-dong
YANG Dian-hai ZHOU Qi

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai
200092, China)

Abstract The treatment of domestic wastewater was studied with high-rate algal pond in rural area of Taihu. The study shows that the characteristics of domestic wastewater in the rural area vary remarkably in different seasons. In autumn and winter, the organic strength is observed to be 3 to 4 times of the strength in summer. Due to the mutualism relationship between algae and bacteria in the pond, dissolved oxygen concentration always remains at a high level and a periodic change each day is shown in pH level. In such a pond system, COD removal is about 70%. Ammonia nitrogen is mainly removed via nitrification and the removal efficiency is up to 90%. Owing to the precipitation at high pH, phosphorus removal reaches 50%. The treatment performance of the system depends greatly on the availability of sunshine and variation of temperature. Therefore, the HRT needs to be increased from 4 days in summer to 8 days in winter. The high velocity can promote mass transfer and thus improve the treatment performance. The water depth is found to have little effect on the treatment performance. High-rate algal pond is able to treat the domestic wastewater generated in rural area.

Key words high-rate algal pond; domestic wastewater from rural area; Taihu; nitrogen and phosphorus removal

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601012)

在太湖水体污染中,面源污染占相当重要的份额,而农村生活污水又是面源污染的主要组成部分。因此对农村生活污水进行集中处理,削减其污染负荷,是当前改善太湖水质面临的迫切问题。

高效藻类塘(High Rate Algae Pond HRAP)是由美国加州大学伯克利分校 Oswald 教授提出并发展的一种传统稳定塘的改进形式^[1]。高效藻类塘内存在的菌藻共生体系有着比一般稳定塘更加丰富的生物相,它通过连续搅拌装置促进污水的完全混合、调节塘内 O₂ 和 CO₂ 的浓度并均衡塘内水温、水质,对有机物、氮和磷均有较好的去除效果。与传统的二级生物处理技术相比,高效藻类塘具有投资低、运行费用省的特点,对于土地资源相对丰富而技术水平相对落后的农村地区具有很好的推广价值。目前高效藻类塘在美国、法国、德国、南非、以色列、菲律宾、泰国、印度、新加坡等国都有应用^[2,3],但在我国尚无应用实例,研究工作也处于起步阶段。笔者考察了高效藻类塘处理太湖地区农村生活污水的效果及其影响因素。

1 试验方法与试验设计

1.1 试验装置

试验地点位于江苏省宜兴市大浦镇洋渚村。洋渚村距太湖西岸约 1.5 km,气候宜人,四季分明,村内常住人口约 2 300 人,外来人口约 700 人。

高效藻类塘试验装置共两套(A和B),如图 1 所示。每套装置长为 1.0 m、宽为 0.32 m,深度分别为 0.3 m 和 0.4 m,采用 10 mm 厚的塑料板制成,池子四角做 45°倒角,中间用 5 mm 厚的塑料板将池子分隔成循环廊道。池内水深分别控制在 0.2 m 和 0.3 m,有效容积分别为 61 L 和 92 L。采用搅拌桨连续搅拌,桨片直径为 0.6 m,宽度为 30 mm。搅拌速度通过无级变速器调节,池内平均水流速度根据试验方案进行调整。生活污水通过管网收集进入沉淀水箱,预沉 12 h 后用蠕动泵送入试验装置。

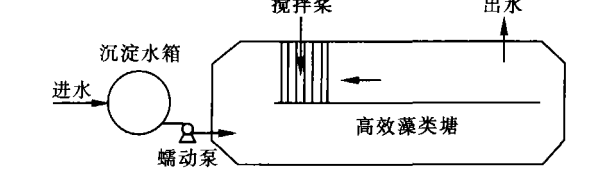


图 1 试验装置及工艺流程

Fig 1 Experimental set up and flow chart

1.2 试验水质

原水中粪便污水所占比例较高,导致氮浓度比一般的城市生活污水高。表 1 为高效藻类塘试验装置进水水质情况。

表 1 高效藻类塘进水水质
Tab 1 Characteristics of raw wastewater mg·L⁻¹

项目	COD	氨氮	总氮	磷酸盐	总磷
范围	46.8~416.9	1.8~108.3	17.1~138.2	1.1~5.7	1.3~9.0

1.3 试验方案

运行方式为连续流,进水时间为 6:00—18:00 晚上停止进水,出水为溢流式,根据水力停留时间确定进水流量。7 月—8 月为系统启动期,8 月后进行工况调整和测试。夏季试验装置内水体呈浓绿色,进入冬季后,水体颜色发暗逐渐变为青绿色至黄褐色,整个试验阶段系统均无恶臭等异味散发。试验方案见表 2。

表 2 试验方案设计
Tab 2 Operating parameters of experimental runs

装置	工况	季节	水深 m	停留时间 d	平均流速 (m·s ⁻¹)	时间
A	1	夏季	0.20	4	0.15	8 月—9 月
	2	夏季	0.20	4	0.20	9 月
	3	秋、冬	0.20	8	0.20	10 月—11 月
	4	秋、冬	0.20	6	0.20	11 月—1 月
B	5	秋、冬	0.30	8	0.20	10 月—11 月
	6	秋、冬	0.30	6	0.20	11 月—1 月

1.4 检测项目与方法

水质检测项目有 pH、溶解氧、COD、氨氮、总氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总磷、正磷酸盐等,采样频率为 1~2 次/周,均按国家标准方法进行分析^[4]。

2 试验结果与分析

2.1 高效藻类塘内 pH、DO 的变化

污水进入高效藻类塘后,塘内 pH 值呈周期性变化:日出以后,pH 值逐渐升高并在 10:00—15:00 出现峰值;其后,随着光照强度的逐渐减弱,pH 值逐渐回落,一般在夜晚保持较低值。塘内 pH 值的变化幅度随季节的不同而有所变化,夏季的 pH 变化范围(6.8~9.5)明显大于秋季(7.5~8.7)。

影响高效藻类塘内 pH 值变化的主要生化反应包括光合作用、呼吸作用、硝化作用和氨化作用等。藻类的光合作用使 pH 值升高,藻类和细菌的呼吸以及硝化作用等则使 pH 值降低。光合作用和呼吸作用通过改变水体中溶解性 CO₂ 平衡体系(CO₂—

$\text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$) 的平衡来改变系统的 pH 值, 而硝化过程则消耗碱度。pH 的变化反映了塘内生化反应的强度, 夏天光照足、藻类浓度高则光合作用强烈, 消耗二氧化碳的速率大, 导致其 pH 峰值较高且波动较大。冬季光照时间短且光照强度较弱, 塘内水温低, 藻类浓度不高且活性差, 致使塘内的 pH 变幅较小。

高效藻类塘内的生化反应不仅使 pH 呈现每日的周期性变化, 也使溶解氧表现出类似变化规律。藻类的光合作用使水中的溶解氧增加, 而细菌降解有机物的过程是个耗氧过程。由于菌藻共生体系的存在, 系统内总体呈好氧状态, 这有利于有机物的去除和氨氮的硝化。每日日出后, 系统开始进水, 塘内 DO 值由于藻类光合作用而升高, 在上午 10 30 就可达到最高值, 之后由于细菌降解有机物而使溶解氧值下降。日落后, 虽然藻类不再进行光合作用, 但系统停止进水, 细菌降解有机物的耗氧减弱, 搅拌器的推进作用使系统复氧, 溶解氧有所上升。但是, 秋、冬季的溶解氧恢复过程迟于夏季, 这是由于秋、冬季进水有机物浓度高, 细菌降解有机物的过程耗时更长。夏季系统内的溶解氧水平 (最高为 8 ~ 9 mg/L) 低于秋、冬季 (最高为 11 ~ 12 mg/L), 这主要是由于气温的降低使水中的饱和溶解氧浓度升高所致。

2.2 对有机物的去除

图 2 为不同工况下对 COD 的去除效果。

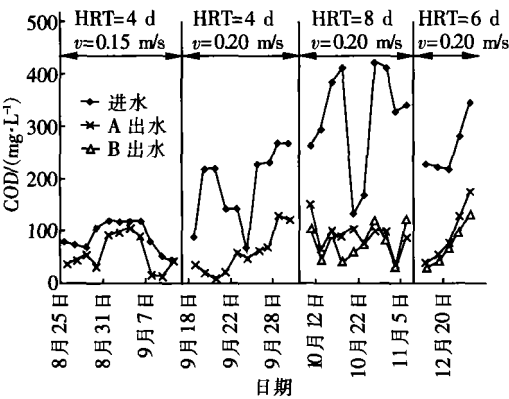


图 2 高效藻类塘对 COD 的去除效果
Fig 2 COD removal effect in HRAP

进入高效藻类塘的有机污染物, 在好氧条件下被异养细菌分解为氨氮、磷酸盐和 CO_2 等产物, 藻类通过光合作用, 利用这些产物作营养来源来合成自身的有机体, 并释放出氧气, 供细菌分解有机物之用, 两者相互依存、不断循环, 使水质得到净化。高

效藻类塘出水中含有较多的藻类, 影响有机物、悬浮物等的达标, 完整的高效藻类塘处理系统需包括后续的藻类收集与去除设施 (如水生生物塘)。笔者仅考察高效藻类塘的处理效果, 因此采用溶解性 COD 衡量高效藻类塘对有机物的去除情况。

由于生活习惯的原因, 农村生活污水水质受季节影响很大, 秋、冬季污水的有机物浓度较夏季高 3 ~ 4 倍。夏季进水 COD < 250 mg/L, 在停留时间为 4 d 塘内流速为 0.2 m/s 的条件下出水 COD < 100 mg/L; 冬季进水 COD 为 250 ~ 400 mg/L, 当塘内流速为 0.2 m/s 时, 需较长的停留时间 (8 d) 才能使出水 COD 降至 50 ~ 100 mg/L。

2.3 氮的去除和转化

图 3 和图 4 分别为不同工况下对氨氮和总氮的去除效果。

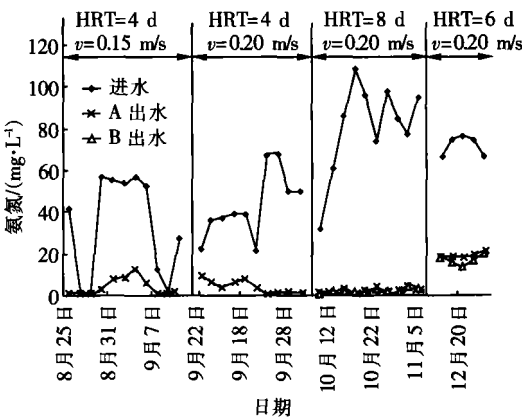


图 3 高效藻类塘对氨氮的去除效果
Fig 3 Ammonia nitrogen removal effect in HRAP

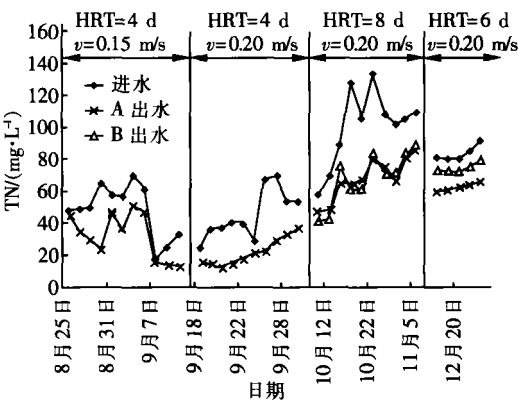


图 4 高效藻类塘对总氮的去除效果
Fig 4 Total nitrogen removal effect in HRAP

进水总氮中氨氮所占比例高达 80%, 其中夏季进水氨氮浓度为 1.8 ~ 70 mg/L, 在停留时间为 4 d

塘内流速为 0.2 m/s 的条件下出水氨氮 < 10 mg/L; 秋、冬季进水氨氮浓度为 70 ~ 110 mg/L, 当停留时间为 8 d 时可确保出水氨氮 < 5 mg/L。可见高效藻类塘对氨氮有很好的去除效果, 去除率可达 90% ~ 97%。

高效藻类塘对总氮的去除效果低于对氨氮的。夏季进水总氮为 20 ~ 70 mg/L, 对其去除率为 50% 左右; 秋、冬季进水总氮为 70 ~ 138 mg/L, 当停留时间为 8 d 时对总氮的去除率仅约 30%。对装置 A 出水总氮的组成进行分析, 发现主要是硝态氮。高效藻类塘去除氨氮的途径主要包括生物同化、挥发和硝化作用等。但对于高效藻类塘内是否存在硝化反应, 不同的研究者得出的结论不大一致。B. Picot 等发现高效藻类塘内 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度很低, 认为硝化作用可以忽略不计^[3]; M. Clean 则认为形成菌藻体膜能提高稳定塘的硝化反应速率^[5]。试验中发现塘内存在明显的硝化反应, 且硝化反应是去除氨氮的主要途径, 这是由于高效藻类塘内溶解氧浓度较高, 提供了硝化反应的必要条件。分析硝态氮的组成, 夏季出水中主要为亚硝酸盐, 而秋、冬季则以硝酸盐为主, 这是由于亚硝化细菌、硝化细菌生长的最适宜 pH 值分别为 6.0 ~ 7.5 和 7.4 ~ 8.3 过高的 pH 值及其变化幅度会导致亚硝酸盐的积累^[6]。夏季塘内 pH 的最大值及其变化幅度均高于秋、冬季的, 有利于亚硝化反应的进行, 导致了亚硝酸盐的积累。

2.4 对磷的去除

图 5 和图 6 分别为不同工况下对总磷和磷酸盐的去除效果。

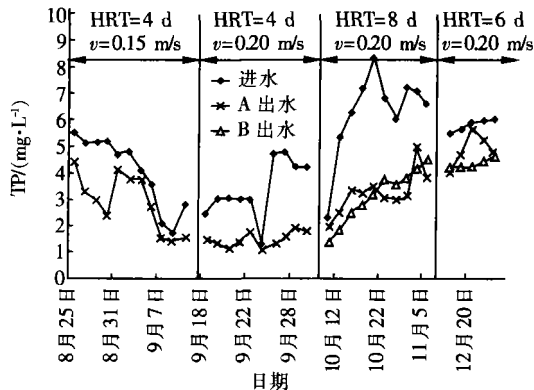


图 5 高效藻类塘对总磷的去除效果

Fig 5 Total phosphorus removal effect in HRAP

夏季进水总磷为 2 ~ 6 mg/L, 对其去除率为

50% 左右; 秋、冬季进水总磷升高至 5 ~ 9 mg/L, 需要较长的停留时间 (8 d) 才能使其去除率达到 45% 左右。高效藻类塘去除磷的途径主要包括微生物同化吸收和磷酸盐沉淀。藻类和细菌因自身生长需要而同化吸收的磷所占比例不大, 一般在 20% 以下。磷酸盐沉淀由 pH 和 Ca^{2+} 离子浓度决定, 磷酸钙在 pH 值为 8 左右时开始形成。高效藻类塘内 pH 值的升高有利于磷酸盐的去除, B. Picot 等认为有 85% 的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的变化与 pH 值密切相关^[3], Michael 认为在藻类塘工艺中所去除的磷酸盐中大约超过 90% 的部分是通过化学沉淀实现的^[7]。白天由于光合作用 pH 值上升, 这使得磷酸根离子更易和钙结合生成沉淀而被去除; 在秋、冬季尽管将停留时间延长至 8 d 但对 TP 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率仍低于夏季, 这是由于夏季光照好, 塘内 pH 值增幅大于冬季 (有时高峰值可以接近 11)。

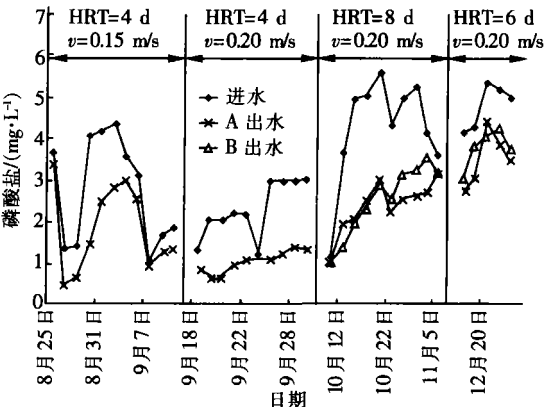


图 6 高效藻类塘对磷酸盐的去除效果

Fig 6 Phosphate removal effect in HRAP

2.5 高效藻类塘运行的影响因素分析

2.5.1 季节

由上述试验结果可知, 季节对高效藻类塘处理农村生活污水的效果影响很大。一方面, 由于生活习惯原因, 秋、冬季农村生活污水的污染物浓度大大高于夏季; 另一方面在秋、冬季节, 温度、光照的时间和强度均低于夏季, 塘内菌藻共生体系的活动强度也较弱。要取得与夏季接近的处理效果, 必需延长停留时间。对于太湖流域农村生活污水的处理而言, 夏季停留时间采用 4 d 冬季停留时间采用 8 d 是合适的。

2.5.2 光照与温度

高效藻类塘内藻类的生长繁殖受很多因素的制约, 主要的环境因子有光照和温度等。由于试验在

室外进行,光照和温度易受季节变化的控制。夏季光照时间长、光照强度高,在一定光强范围内,光合作用率随光强增加而增加。藻类对温度也有一定的忍受限,不同的藻类有不同的最适温度,但对于大多数藻类来说,最适的生长温度大约为 18~25℃。试验过程中,夏季水温可保持在 25~30℃,冬季只能维持在 15℃左右。在光照和温度条件不适的冬季只能通过延长停留时间来稳定高效藻类塘的处理效果。

2.5.3 塘内流速

工况 1、2 采用相同的停留时间,塘内流速分别为 0.15 m/s 和 0.20 m/s 其除污效果比较见表 3。

表 3 流速对去除效果的影响

Tah 3 Effect of cross sectional velocity on treatment performance

工 况	COD		氨氮		总氮		磷酸盐		总磷	
	进水 (mg/L ⁻¹)	去除 率/%	进水 (mg/L ⁻¹)	去除 率/%	进水 (mg/L ⁻¹)	去除 率/%	进水 (mg/L ⁻¹)	去除 率/%	进水 (mg/L ⁻¹)	去除 率/%
1	88.33	37.2	32.97	87.8	47.68	32.1	2.75	32.1	4.07	28.7
2	186.6	70.2	42.85	90.2	45.34	52.9	2.28	53.8	3.38	55.4

由表 3 可知,除 COD 和氨氮外,在进水污染物浓度差异不大的情况下,较高流速下的去除效果明显优于低流速的,这是由于高流速强化了系统的传质效果,促进了生化反应的进行。

2.5.4 塘内水深

高效藻类塘水深的选择需考虑两个因素:光照和复氧。水深较浅可使阳光透入池底,利于塘内藻类的光合作用;同时,池深较浅、塘表面积大也都有利于风力的搅动进行自然复氧,使塘内保持好氧状态。因此高效藻类塘的塘深一般设计得较浅,为 0.2~0.6 m,而传统稳定塘的深度根据其类型不同一般为 0.5~2.0 m^[8]。研究中,工况 3、5 采用相同的进水、停留时间和流速,水深分别为 0.2 m 和 0.3 m,廊道的宽深比分别为 0.8 和 0.5 从图 2~4 和图 5~6 可以看出,水深在 0.2~0.3 m 时,对高效藻类塘的除污效果影响不大。在实际工程中高效藻类塘廊道的宽深比可达 4 以上,此时水深保持 0.2~0.6 m 可以取得良好的运行效果。

3 结论

① 太湖地区农村生活污水水质受生活习惯和季节影响的变化很大,秋、冬季的有机物浓度较夏季高约 3~4 倍。氮污染物浓度大大高于一般的城市污水。

② 高效藻类塘内存在的菌藻共生体系使塘内保持好氧状态,pH 值存在周期性变化,这有利于去除污水中的污染物。对 COD 的平均去除率可达 70%,对氨氮的平均去除率>90%,对总磷和磷酸盐的去除率约为 50%。氨氮主要通过硝化作用去除;沉淀作用则是高效藻类塘除磷的最有效机制,并受 pH 值控制。

③ 较高流速(0.20 m/s)强化了系统的传质,促进了生化反应,除污效果明显优于低流速的(0.15 m/s)。高效藻类塘在塘深较浅的条件下(0.2~0.6 m),其除污效果受塘深影响较小。

④ 高效藻类塘的运行效果受季节性光照和温度变化影响很大,夏季停留时间取 4 d 可获得很好的除污效果,冬季将水力停留时间延长至 8 d 对保障系统的运行效果是有效的。高效藻类塘系统能较好地处理太湖地区的农村生活污水。

参考文献:

[1] Gímez E, Casellas G, Picot B. Ammonia elimination processes in stabilization and high rate algae pond systems[J]. Wat Sci Tech 1995 31(7): 303-312

[2] 韩仕群,张振华,严少华. 国内外利用藻类技术处理废水、净化水体研究现状[J]. 农业环境发展, 2000 (1): 13-16

[3] Picot B. Nutrient removal by high rate pond system in a mediterranean climate (France) [J]. Wat Sci Tech 1991 23(8): 1535-1541.

[4] 国家环保局. 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, 2002

[5] Mckean BM, Baskaran K, Connor M A. The use of algal bacterial biofilms to enhance nitrification rates in lagoons: experience under laboratory and pilot scale conditions [J]. Wat Sci Tech 2000 42(10-11): 187-194

[6] 徐冬梅. 亚硝酸型硝化的试验研究[J]. 给水排水, 1999 25(7): 37-39.

[7] Costa R H R, Medri W, Pardo M C C. High rate pond for treatment of piggery wastes [J]. Wat Sci Tech 2000 42(10-11): 357-362

[8] 许春华,周琪. 高效藻类塘的研究与应用[J]. 环境保护, 2001 8: 41-43

作者简介: 黄翔峰(1974-), 男, 福建古田人, 博士、讲师, 研究方向为水污染控制。
电话: (021) 65982592 28516039
E-mail: hx@mail.tongji.edu.cn
收稿日期: 2005-10-25