

## 乡镇污水低成本处理简易型交替曝气塘工艺

王 晟<sup>1</sup>, 徐祖信<sup>1</sup>, 杨彬彬<sup>2</sup>, 李怀正<sup>1</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海千年工程建设咨询有限公司, 上海 201108)

**摘要:** 针对乡镇污水处理需求,以 Unitank 和三沟式氧化沟的工艺为基础,整合曝气塘工艺的优点,提出一种简易型交替曝气塘工艺.结果表明,边池是交替式曝气塘完成脱氮除磷过程的关键单元,其效果必须通过对边池进水量与曝气量的恰当设定来实现.优化的控制模式,即反应周期  $T$  为 6 h,边池进水量/中池进水量( $R_Q$ )为 2,总曝气时间/总进水时间( $R_{A/Q, total}$ )为 1 和边池曝气时间/进水时间( $R_{A/Q, side}$ )为 0.5,既能够维持污泥浓度稳定和污泥活性,又能使脱氮和除磷的矛盾取得平衡,出水优于《城镇污水处理厂污染物排放标准 GB 18918—2002》一级 B 排放标准.近两年的工程实践证明:简易型交替曝气塘污水处理工艺具有基建投资低、施工简易、运转灵活及占地较小的优点,是适用于乡镇的一种简易加强型污水处理技术.

**关键词:** 乡镇; 脱氮; 除磷; 简易型交替曝气塘

**中图分类号:** X 703.1

**文献标识码:** A

### Low Cost Wastewater Treatment in Small Towns and Rural Areas by Simply-Constructed Alternate Aerated Ponds

WANG Sheng<sup>1</sup>, XU Zuixin<sup>1</sup>, YANG Binbin<sup>2</sup>, LI Huaizheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Thousand Year Consultants Co. Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** A simply-constructed alternate aerated pond was proposed based on the integration of Unitank, tri-channel oxidation ditch and aerated pond. Results show that the side tank plays key role in denitrification and dephosphorization, and the ideal performance can only be achieved by artful setting for inflow and aeration in side tank. Under the optimized control mode, cycling time = 6h, ratio of inflow-side tank to inflow-middle tank = 2, ratio of aeration time to inflow time for the whole system = 1, and ratio of aeration time to inflow time for side tank = 0.5. Running by this mode can

maintain the activity and concentration of sludge, and attain a good balance of denitrification and dephosphorization, so that effluent reached Level - 1 B of China's Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant. By two years' full scale operation, simply-constructed alternate aerated pond is proved to be a useful method for water pollution control in Chinese rural towns with its advantages of low cost, simple maintenance and good effluent quality.

**Key words:** rural town; denitrification; dephosphorization; simply-constructed alternate aerated pond

近年来,随着节能减排工作的推进,我国城市污水治理取得长足进步.2007 年末,全国城市建成区排水管道密度为  $8.34 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ ,城市污水处理率达到 62.8%;县城建成区排水管道密度为  $5.48 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ ,县城污水处理率达到 22.6%.相比之下,在我国农村地区加快城镇化的进程中,乡镇环境基础设施建设普遍滞后.2007 年,全国建制镇和乡建成区排水管道密度分别为  $3.08 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$  和  $1.43 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ ,污水处理率尚未开展统计公报<sup>[1]</sup>.目前,我国居住在乡村的人口为 74471 万人,占总人口的 57.01%<sup>[2]</sup>.乡镇生活污染成为面源污染的重要因素.

乡镇污染特点不同于城市地区,难以直接采用城市污染治理技术模式.由于缺乏具有普遍指导作用的乡镇生活污染控制技术标准,乡镇污染治理中出现了各种问题,或沿用城市集中处理模式导致投资过高,或放任排放造成严重环境污染.因此,急需一批适合乡镇的小型污水处理技术.

本文根据在上海某县实施乡镇污水处理的经验,研发一种简易型交替曝气塘污水处理工艺,以期降低建设投资并易于管理,为应用推广打下基础.

收稿日期: 2009-09-03

基金项目: 上海市科学技术委员会攻关项目(07dz12048)

作者简介: 王 晟(1977—),男,工学博士,讲师,主要研究方向为村污水处理理论和技术. E-mail: wangs\_tj@yahoo.com.cn

1 材料与方法

1.1 工艺提出

本文以 Unitank 和三沟式氧化沟的工艺为基础,整合曝气塘工艺的优点,提出一种简易型交替曝气塘工艺 (simply-constructed alternate aerated ponds, SCAAP). 施工过程如下: 选择位于乡镇建成区下风向的平整场地,45 度开挖并于塘四周堆土,形成可容纳水深 2~3 m 的 3 个池塘;在塘内铺设防渗膜,安装连通管、进水管、出水管和排泥管后,在防渗膜上砌砖,水泥砂浆抹面,即可完成塘体施工;安装表面曝气器、控制进出水与排泥的电动/气动阀和可编成控制柜 (PLC) 后,便可交付使用,见图 1. 图中 E1,E2 和 E3 为进水阀,F1 和 F2 为出水阀,H1 为排泥阀,G1,G2 和 G3 为表面曝气器.

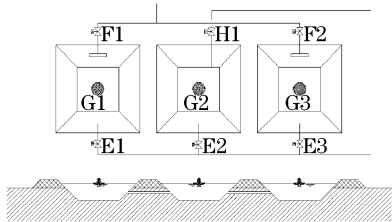


图 1 简易型交替曝气塘工艺示意图  
Fig.1 Schematic diagram of SCAAP

1.2 工艺设计思路

乡镇生活污水流量的日变化系数大,污水处理工艺必须具有灵活多样的运行方式,以适应水量的波动. 交替式曝气塘采用周期交替运行的方式,通过周期性的厌氧/缺氧/好氧反应和沉淀去除水中有机物和营养盐. 中池始终作为反应池,两个边池交替作为反应池和沉淀池. 污水亦交替从 3 个池连续或间歇地流入,经处理后交替从两个边池连续或间歇排出. 通过调整进水方式、曝气方式和交替周期,可以应对一定范围内的水质水量波动. 设计时,将交替式曝气塘的运行方式分为: (1) 最小日: 污水沿三池单向依序流动,定期反向切换,间歇曝气,类似串联曝气塘; (2) 平均日: 污水沿三池交替双向流动,间歇曝气,类似三沟式氧化沟; (3) 最大日: 污水沿三池交替双向流动,连续曝气,类似 Unitank.

本文介绍在平均日流量下,交替式氧化塘的运行优化、处理效果和应用情况. 经综合考虑,取平均日平均时流量下的水力停留时间为 20h,既为最大日流量储备处理容量考虑,也可实现污泥塘内稳定.

1.3 实验装置

在实验室建立模拟实验装置研究工艺的优化运行模式,再到实践中去验证其可行性. 实验装置是由有机玻璃制成的矩形反应器,分为 3 格,每格尺寸为 200 mm×200 mm×450 mm,出水堰在 400 mm 高处,故总有效容积为 48 L,见图 2. 图中,E1,E2 和 E3 为进水阀;F1 和 F2 为出水阀;G1,G2 和 G3 为曝气器;J1 和 J2 为搅拌器. 实验期间,通过时间继电器控制装置自动运行. 采用限制性恒定曝气,调节曝气器使稳定运行的溶解氧(DO)最大值不超过 4 mg·L<sup>-1</sup> 后恒定不变,水力停留时间为 20 h.

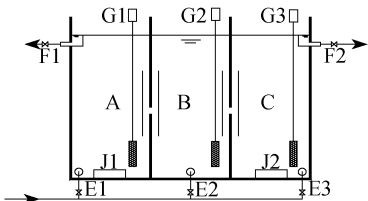


图 2 实验装置示意图  
Fig.2 Schematic structure of experimental set-up

试验污水取自上海市某污水处理厂沉砂池出水,水质见表 1. 试验开始时,驯化污泥取自该厂二沉池回流污泥. 按照国家环境保护部发布的标准方法<sup>[3]</sup>,监测 COD(化学需氧量)、TN(总氮)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N(氨氮)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N(硝酸盐氮)、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>—N(亚硝酸盐氮)、TP(总磷)和 MLSS(污泥浓度). 同时,采用 HACH-HQ10 型溶氧仪、PHS-25 型酸度计和 ORP-411 型氧化还原电位仪,监测 DO、酸碱度 pH 值和氧化还原电位 ORP 的变化.

表 1 进水水质参数质量浓度  
Tab.1 Concentration of influent water  
quality parameters mg·L<sup>-1</sup>

| 水质指标                              | 浓度范围          | 平均值       |
|-----------------------------------|---------------|-----------|
| $\rho_{\text{COD}}$               | 169.43~394.90 | 268.720 0 |
| $\rho_{\text{TN}}$                | 18.45~45.74   | 30.650 0  |
| $\rho_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}$ | 16.18~29.66   | 24.550 0  |
| $\rho_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ | 0.24~1.27     | 0.680 0   |
| $\rho_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ | 0~0.017       | 0.008 7   |
| $\rho_{\text{TP}}$                | 2.58~5.81     | 4.300 0   |

1.4 试验方法

根据对 Unitank 和三沟式氧化沟的文献调研及本工艺特点,设定一个初始模式开始运行. 监测运行结果并分析原因后调整参数,得到新的运行模式继续进行试验,以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准 GB 18918—2002》的一级 B 排放标准为目标,逐

步寻优最终确定运行模式. 研究中尝试了多种模式, 本文介绍其中具有代表性的 3 种.

2 结果与讨论

2.1 运行模式研究

2.1.1 模式一

依照文献[4-5]报道的 Unitank 和三沟式氧化沟运行方式, 设定模式一, 见图 3. 图中 A, B, C 表示反应池, 数字表示运行时间. 设定反应周期  $T = 8\text{ h}$ ,

半周期  $T/2 = 4\text{ h}$ .

周期开始的 90 min, 污水从 A 池连续进入, A 池只搅拌不曝气. 接下来的 150 min 里, 污水改从 B 池进入, A 池继续搅拌 45 min—曝气 45 min—澄清 60 min, B 池始终连续曝气, C 池则是沉淀池. 之后, 进入下半周期切换 A, C 两池运行方式, 其控制模式与上半周期对称. 整个周期中, 边池进水量/中池进水量( $R_Q$ )为 0.6, 曝气时间/进水时间( $R_{A/Q, \text{total}}$ )为 1.2, 边池曝气时间/边池进水时间( $R_{A/Q, \text{side}}$ )为 0.5.

|   |          |                 |  |  |  |                  |  |  |
|---|----------|-----------------|--|--|--|------------------|--|--|
| A | 进/出水控制时间 | 进水<br>搅拌<br>90  | 不进不出<br>搅拌<br>45    曝气<br>45    沉淀<br>60 |  |  | 排水<br>沉淀<br>240  |  |  |
|   |          |                 |  |  |  |                  |  |  |
| B | 进/出水控制时间 | 不进不出            | 进水<br>曝气<br>150                          |  |  | 不进不出<br>曝气<br>90 | 进水<br>曝气<br>150                          |  |
|   |          |                 |  |  |  |                  |  |  |
| C | 进/出水控制时间 | 排水<br>沉淀<br>240 |  |  |  | 进水<br>搅拌<br>90   | 不进不出<br>搅拌<br>45    曝气<br>45    沉淀<br>60 |  |
|   |          |                 |  |  |  |                  |  |  |

图 3 模式一运行程序图(单位:min)

Fig.3 Program of mode 1(unit:min)

表 2 显示了按模式一运行时的平均处理水质. 出水中 COD、氮和磷均未能达到一级 B 排放标准.

表 2 模式一运行期间平均处理水质  
Tab.2 Water parameters of mode 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

|       | $\rho_{\text{COD}}$ | $\rho_{\text{TN}}$ | $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ | $\rho_{\text{NO}_3^--\text{N}}$ | $\rho_{\text{TP}}$ |
|-------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 进水    | 352.93              | 22.21              | 19.34                           | 1.27                            | 3.17               |
| 出水    | 74.13               | 10.56              | 9.3                             | 3.2                             | 1.66               |
| 去除率/% | 79.0                | 52.5               | 51.9                            |                                 | 47.6               |
| 一级 B  | 60                  | 20                 | 8(15)                           |                                 | 1                  |

注: 括号外数值为水温  $\geq 12\text{ }^\circ\text{C}$  时的控制指标, 括号内数值为水温  $\leq 12\text{ }^\circ\text{C}$  时的控制指标(下同).

图 4 显示了按模式一运行时, A 池在一个周期中的水质指标和反应环境参数变化. 对模式一处理效果不佳的原因分析如下:

(1) 边池硝化反应不完全, 残留  $\text{NH}_4^+$  浓度高影响出水水质. 边池指 A 池和 C 池, 中池指 B 池, 下同. 边池是污水处理后流出系统的最后单元, 因此, 边池在反应结束时水中残留污染物浓度对系统出水水质有重要影响. 由图 4 可见, 边池在反应阶段硝化反应不足, 反应结束时残留  $\text{NH}_4^+$  浓度仍有  $9 \sim 10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 边池在搅拌阶段聚磷菌释磷反应不足, 影响了后续吸磷效果, 反应结束时残留 TP 浓度仍很高; 这两方面共同对出水中氮、磷浓度造成了负面影响.

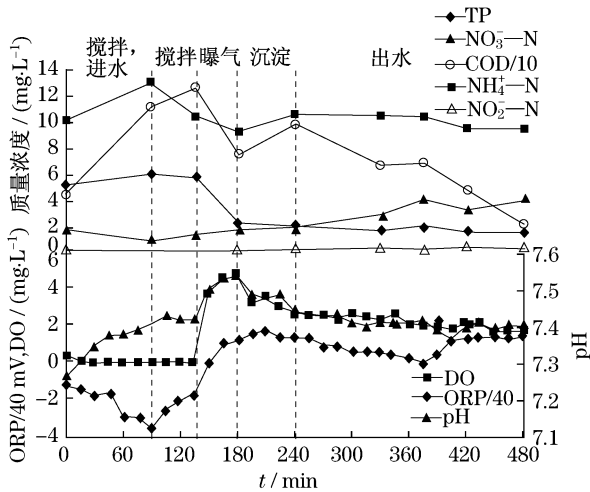


图 4 模式一运行时边池半周期参数变化

Fig.4 Curve of water parameters of side tank of mode 1

(2) 污泥浓度变化和污泥活性影响处理效果. 污泥浓度和污泥活性是决定反应速率的关键. 在 Unitank 系统中, 污泥始终处于从边池—中池的双向流动中, 周期越长, 污泥浓度波动就越大, 对处理效果的影响也越大<sup>[6]</sup>. 另外, 当水力停留时间为 20 h 时中池采用连续曝气供氧量大大超出污染物净化需氧量, 污泥进入好氧稳定期或衰减期, 平均污泥浓度仅为  $1\,500\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 从性状上看污泥活性不足.

综上,模式一 8h 反应周期偏长,总曝气量偏大.

2. 1. 2 模式二

在模式一基础上调整运行模式:缩短周期以减小污泥浓度波动;减少总曝气量以维持污泥活性,但是增强边池曝气以强化边池硝化;延长边池进水时间以促进反硝化和释磷. 设定模式二如图 5 所示,  $T = 6\text{ h}$ ,  $T/2 = 3\text{ h}$ .

周期开始的 120 min,污水从 A 池连续进入,A

池在前 60 min 只搅拌不曝气(O),之后澄清(S)15 min—曝气 30 min—澄清 15 min. 接下来的 60 min 里,污水改由 B 池进入, A 池曝气 30 min,澄清 30 min. B 池始终处于曝气 20 min—停曝 10 min 的间歇曝气反应中, C 池则是沉淀池. 再后来切换 A, C 两池进入下半周期,其控制模式与上半周期对称. 整个周期中,  $R_Q = 2$ ,  $R_{A/Q, \text{total}} = 1$ ,  $R_{A/Q, \text{side}} = 0.5$ .

| A | 进/出水 |  | 进水  |    |    |    | 不进不出 |    | 排水 |    |     |    |    |    |     |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|------|--|-----|----|----|----|------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|   | 控制时间 |  | 搅拌  |    | 15 | 曝气 |      | 30 | 15 | 曝气 |     | 沉淀 |    | 沉淀 |     |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|   |      |  | 60  |    | 15 | 30 |      | 15 | 30 | 60 | 180 |    |    |    |     |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| B | 进/出水 |  | 不进水 |    |    |    |      |    |    |    | 进水  |    |    |    | 不进水 |    |    |    |      |    |    |    | 进水 |    |    |    |    |    |    |    |    |
|   | 控制时间 |  | 曝气  |    | 曝气 |    | 曝气   |    | 曝气 |    | 曝气  |    | 曝气 |    | 曝气  |    | 曝气 |    | 曝气   |    | 曝气 |    | 曝气 |    | 曝气 |    | 曝气 |    |    |    |    |
|   |      |  | 10  | 20 | 10 | 20 | 10   | 20 | 10 | 20 | 10  | 20 | 10 | 20 | 10  | 20 | 10 | 20 | 10   | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 |    |
| C | 进/出水 |  | 排水  |    |    |    |      |    |    |    | 进水  |    |    |    |     |    |    |    | 不进不出 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|   | 控制时间 |  | 沉淀  |    |    |    |      |    |    |    | 搅拌  |    |    |    | 曝气  |    |    |    | 曝气   |    |    |    | 沉淀 |    |    |    |    |    |    |    |    |
|   |      |  | 180 |    |    |    |      |    |    |    | 60  |    |    |    | 15  |    |    |    | 30   |    |    |    | 15 |    |    |    | 30 |    |    |    | 30 |

图 5 模式二运行程序图(单位:min)

Fig.5 Program of mode 2 (unit:min)

表 3 显示了按模式二运行时的平均处理水质. 处理效果很好,不仅 COD 达到了一级 B 标准,而且出水氮、磷达到了一级 A 排放标准.

表 3 模式二运行期间平均处理水质

Tab.3 Water parameters of mode 2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

|       | $\rho_{\text{COD}}$ | $\rho_{\text{TN}}$ | $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ | $\rho_{\text{NO}_3^--\text{N}}$ | $\rho_{\text{TP}}$ |
|-------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 进水    | 290.83              | 29.14              | 22.34                           | 0.24                            | 3.42               |
| 出水    | 56.48               | 11.11              | 4.22                            | 6.63                            | 0.36               |
| 去除率/% | 80.6                | 61.9               | 81.1                            |                                 | 89.5               |
| 一级 B  | 60                  | 20                 | 8(15)                           |                                 | 1                  |
| 一级 A  | 50                  | 15                 | 5(8)                            |                                 | 0.5                |

图 6 显示了按模式二运行时, A 池在一个周期中的水质指标和反应环境参数变化.

实验装置的脱氮和释磷过程主要是在边池完成的,模式二时边池脱氮除磷反应比较充分. 由图 6 可见,边池在进水搅拌的 60 min 里, DO 降至 0, ORP 降至  $-50\text{ mV}$  以下,反硝化反应完全,  $\text{NO}_3^-$  的质量浓度接近于 0. 由于反硝化过程产生碱度, pH 不断上升直到第 50 min 后趋于稳定. 接下来 60 min 的间歇曝气过程中, ORP 提高到  $100\text{ mV}$  以上,反应结束时  $\text{NH}_4^+$  的质量浓度降至  $6\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TP 的质量浓度低于  $1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 当 A 池变为沉淀池以后,中池硝化液的流入使 A 池水中  $\text{NH}_4^+$  和 TP 的质量浓度进一步降低,因此,出水水质好.

由图 6 可见,若还要继续提高系统的处理效果,

则还可尝试进一步降低出水 COD 和  $\text{NH}_4^+$  的质量浓度. 模式二中,边池澄清时间只有 30 min,一些有机碎屑不能及时完成固液分离影响出水 COD;此外,边池硝化反应不够充分,  $\text{NH}_4^+$  仍然存在残留.

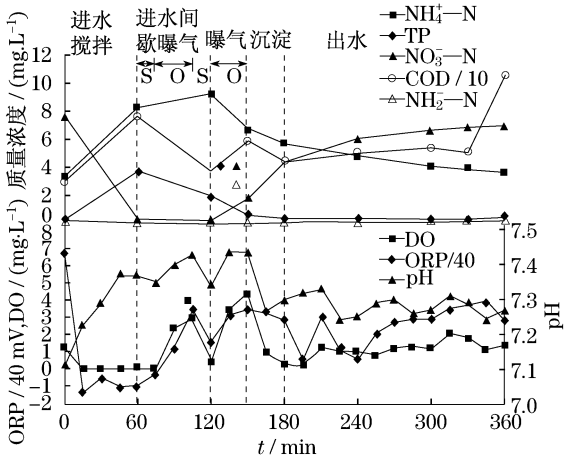


图 6 模式二运行时边池半周期参数变化

Fig.6 Curve of water parameters of side tank of mode 2

2. 1. 3 模式三

在模式二基础上调整运行模式:降低边池进水量以降低边池残留  $\text{NH}_4^+$  质量浓度,延长边池澄清时间为 45min 以降低边池残留 COD 质量浓度. 设定模式三如图 7 所示,  $T = 6\text{ h}$ ,  $T/2 = 3\text{ h}$ .

周期开始的 90 min,污水从 A 池连续进入,A 池

在前 60 min 只搅拌不曝气,之后曝气 30 min. 接下来的 90 min 里,污水改由 B 池进入,A 池停曝 15 min 后,曝气 30 min,再澄清 45 min. B 池始终处于曝气 20 min—停曝 10 min 的间歇曝气反应中,C 池

则是沉淀池.再后来切换 A,C 两池进入下半周期,其控制模式与上半周期对称.整个周期中, $R_Q = 1$ , $R_{A/Q, total} = 1$ , $R_{A/Q, side} = 1$ .

|   |                  |           |          |          |          |          |          |           |          |    |          |    |          |      |          |    |          |    |          |
|---|------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----|----------|----|----------|------|----------|----|----------|----|----------|
| A | 进/出水<br>控制<br>时间 | 进水        |          |          | 不进不出     |          |          | 排水        |          |    |          |    |          |      |          |    |          |    |          |
|   |                  | 搅拌<br>60  |          | 曝气<br>30 | 15       | 曝气<br>30 | 沉淀<br>45 | 沉淀<br>180 |          |    |          |    |          |      |          |    |          |    |          |
|   |                  |           |          |          |          |          |          |           |          |    |          |    |          |      |          |    |          |    |          |
| B | 进/出水<br>控制<br>时间 | 不进不出      |          |          |          |          |          | 进水        |          |    | 不进不出     |    |          | 进水   |          |    |          |    |          |
|   |                  | 10        | 曝气<br>20 | 10       | 曝气<br>20 | 10       | 曝气<br>20 | 10        | 曝气<br>20 | 10 | 曝气<br>20 | 10 | 曝气<br>20 | 10   | 曝气<br>20 | 10 | 曝气<br>20 | 10 | 曝气<br>20 |
|   |                  |           |          |          |          |          |          |           |          |    |          |    |          |      |          |    |          |    |          |
| C | 进/出水<br>控制<br>时间 | 排水        |          |          |          |          |          | 进水        |          |    |          |    |          | 不进不出 |          |    |          |    |          |
|   |                  | 沉淀<br>180 |          |          |          |          |          | 搅拌<br>60  |          |    | 曝气<br>30 |    |          | 15   | 曝气<br>20 |    | 沉淀<br>45 |    |          |
|   |                  |           |          |          |          |          |          |           |          |    |          |    |          |      |          |    |          |    |          |

图 7 模式三运行程序图(单位:min)

Fig. 7 Program of mode 3 (unit:min)

模式三的试验结果见表 4. 由表可见,与模式二运行结果相比,尽管出水 COD 和  $\text{NH}_4^+$  的质量浓度均降低了,其中  $\text{NH}_4^+$  的质量浓度低到只有  $0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 但是对 TP 去除效果不理想,出水 TP 质量浓度超出了一级 B 排放标准.

表 4 模式三运行期间平均处理水质

Tab. 4 Water parameters of mode 3  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

|       | $\rho_{\text{COD}}$ | $\rho_{\text{TN}}$ | $\rho_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}$ | $\rho_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ | $\rho_{\text{TP}}$ |
|-------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 进水    | 224.32              | 26.06              | 23.94                             | 0.77                              | 2.58               |
| 出水    | 53.04               | 13.94              | 0.64                              | 7.08                              | 2.37               |
| 去除率/% | 76.4                | 46.5               | 97.3                              |                                   | 8.1                |
| 一级 B  | 60                  | 20                 | 8(15)                             |                                   | 1                  |
| 一级 A  | 50                  | 15                 | 5(8)                              |                                   | 0.5                |

图 8 显示了按模式三运行时,A 池在一个周期中的水质指标和反应环境参数变化.

残留  $\text{NO}_3^-$  影响聚磷菌释磷,是导致模式三除磷效果不佳的主要原因. 按模式三运行时边池硝化反应充分,反应结束时  $\text{NH}_4^+$  的质量浓度低于  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,造成大量  $\text{NO}_3^-$  残留,反硝化反应结束时  $\rho_{\text{NO}_3^-}$  仍大于  $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 尽管这一阶段  $\text{DO} = 0$ , $\text{NO}_3^-$  的存在却使 ORP 始终大于 0, $\text{NO}_3^-$  抑制了释磷反应,反硝化结束时 TP 的质量浓度只增加了不到 25%,严重影响后续吸磷过程进行,最终导致系统对 TP 几乎没有去除.

## 2.2 运行模式讨论

实验装置中脱氮和除磷两过程存在矛盾. 边池进行脱氮除磷的过程类似厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)工艺,需经过缺氧/厌氧/好氧的 3 个反应阶段才能完成脱氮除磷. 然而,为了降低污泥浓度波动总反应周期

只有 6 h,边池反应半周期的时间只有 3 h,扣除掉切换为沉淀池前必须的 30 min 澄清后,边池反应时间最多只有 2.5 h. 在如此短的时间内,要完成缺氧/厌氧/好氧这 3 个反应阶段是很困难的. 因此,只能牺牲一部分好氧反应时间,来保证厌氧反应的进行,才能在脱氮和除磷之间取得一个综合最优的结果.

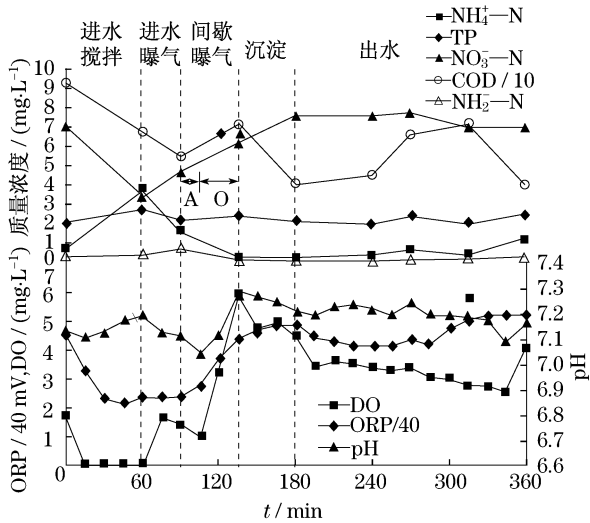


图 8 模式三运行时边池半周期参数变化

Fig. 8 Curve of water parameters of side tank of mode 3

汇总 3 种模式的运行参数见表 5,总结为:(1)反应周期以 6 h 为宜. 过长不利于维持污泥浓度稳定和污泥活性,过短则不利于脱氮除磷反应的进行.(2) $R_{A/Q, total} = 1$  即可. 这与常规活性污泥法是一致的,由于水力停留时间已经比较长,增加曝气时间不利于

维持污泥活性。(3)脱氮除磷可以通过边池进水量与曝气量的优化组合来实现。延长边池进水时间,有利于进行厌氧释磷反应,但是不利于对  $\text{NH}_4^+$  的完全硝化;延长边池曝气时间,有利于对  $\text{NH}_4^+$  的去除,但是总反应时间限制和  $\text{NO}_3^-$  累积会使厌氧释磷反应受到抑制。模式二能够在脱氮和除磷之间达到一个平衡,使出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准 GB 18918—2002》一级 B 排放标准,并使其中氮、磷浓度达到一级 A 标准。

表 5 三种模式的运行参数比较  
Tab.5 Comparison of the three modes

| 类别    | 参数                              | 模式一  | 模式二  | 模式三  |
|-------|---------------------------------|------|------|------|
| 运行参数  | $T/\text{h}$                    | 8    | 6    | 6    |
|       | $R_Q$                           | 0.6  | 2    | 1    |
|       | $R_{A/Q,\text{total}}$          | 1.2  | 1    | 1    |
|       | $R_{A/Q,\text{side}}$           | 0.5  | 0.5  | 1    |
| 去除率/% | $\rho_{\text{COD}}$             | 79.0 | 80.6 | 76.4 |
|       | $\rho_{\text{TN}}$              | 52.5 | 61.9 | 46.5 |
|       | $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ | 51.9 | 81.1 | 97.3 |
|       | $\rho_{\text{TP}}$              | 47.6 | 89.5 | 8.1  |
| 标准    |                                 | 二级   | 一级 B | 二级   |

2.3 应用案例

2008 年 5 月,根据上述研究成果在上海市崇明县某镇建成的镇区污水简易型交替式曝气塘处理工程开始通水试运行,见图 9。该工程设计平均日处理规模  $250\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ,采用如图 1 所示的工艺组成和结构。建设交替曝气塘涉及的土建和安装(含曝气器、电气及管道)工程折算吨水投资不到 700 元。目前,该工程已运行近 2 年,平均处理水量为  $160\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ,出水达到了一级 B 排放标准。实践证明,简易型交替曝气塘具有基建投资低、占地较少、施工简易、运转灵活、出水水质好的优点,适用于经济技术条件差、土地较为紧张而又对出水水质要求较高的乡镇。



图 9 位于上海市崇明县的工程实景照片  
Fig.9 Photo of a full scale plant in Chongming County of Shanghai City

3 结论

(1) 边池是交替式曝气塘完成脱氮除磷过程的关键单元,其效果必须通过对边池进水量与曝气量的恰当设定来实现。

(2) 通过工艺寻优得到的模式二控制方式,即  $T=6\text{ h}$ ,  $R_Q=2$ ,  $R_{A/Q,\text{total}}=1$  和  $R_{A/Q,\text{side}}=0.5$ ,既能够维持污泥浓度稳定和污泥活性,又能使脱氮和除磷的矛盾取得平衡,出水优于《城镇污水处理厂污染物排放标准 GB 18918—2002》一级 B 排放标准。

(3) 本文提出的乡镇污水简易型交替曝气塘处理工艺,特点为基建投资低、施工简易、运转灵活及出水水质好。经过近 2 年的工程实践,被证明是一种适于土地紧张、经济技术条件差且对出水水质要求高的建制镇和集镇的简易加强型污水处理技术。

参考文献:

[1] 国家住房和城乡建设部. 2007 年城市、县城和村镇建设统计公报[EB/OL]. (2008-06-24)[2009-11-02]. [http://www.cin.gov.cn/hytj/jshytjgb/200806/t20080624\\_173507.htm](http://www.cin.gov.cn/hytj/jshytjgb/200806/t20080624_173507.htm). Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Statistical bulletin of urban-rural development in China in 2007[EB/OL]. (2008-06-24)[2009-11-02]. [http://www.cin.gov.cn/hytj/jshytjgb/200806/t20080624\\_173507.htm](http://www.cin.gov.cn/hytj/jshytjgb/200806/t20080624_173507.htm).

[2] 国家统计局. 2005 年全国 1% 人口抽样调查主要数据公报[EB/OL]. (2006-03-16)[2009-11-02]. [http://www.stats.gov.cn/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/t20060316\\_402310923.htm](http://www.stats.gov.cn/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/t20060316_402310923.htm). National Bureau of Statistics of China. A sample survey conducted among one percent of the total population in 1995[EB/OL]. (2006-03-16)[2009-11-02]. [http://www.stats.gov.cn/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/t20060316\\_402310923.htm](http://www.stats.gov.cn/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/t20060316_402310923.htm).

[3] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. Ministry of Environmental Protection. Monitoring and analytic method on water and wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[4] 张忠祥, 钱易. 废水生物处理新技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. ZHANG Zhongxiang, QIAN Yi. New technologies of biological treatment of wastewater [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[5] 周雹. 活性污泥工艺简明原理及设计计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. ZHOU Bao. Theory and design of activated sludge process[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[6] ZHANG Fagen, LIU Junxin, SUI Jun. Sludge concentration dynamic distribution and its impact on the performance of Unitank[J]. Journal of Environmental Science, 2007, 19: 141.