

厌氧水解酸化-好氧氧化 $A_1/A_2/O$ 工艺剩余污泥减量对系统运行效果的影响

杨波¹, 陈季华¹, 奚旦立¹, 李方¹, 田晴¹, 许世梁²

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市市政工程设计研究院, 上海 200092)

摘要:在碱减量印染废水 $A_1/A_2/O$ 生物处理系统中, 利用污泥回流可以实现对剩余污泥的有效减量. 剩余污泥回流到 A_1 段, 增加了 A_1 段中污泥的有机负荷, 却提高了系统对 COD 的去除率. 在 A_1 段 COD 容积负荷 $2.54 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、水力停留时间为 9.45 h 和 7.56 h 条件下, A_1 段 COD 的去除率分别由 15.9% 提升至 23.9%, 12.3% 提升至 22.8%. 在进水 COD 浓度 $1\,000 \text{ mg/L}$ 、 A_1 段 COD 容积负荷 $2.54 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、进水色度 450 倍、系统温度 30°C 条件下, A_1 段出水色度有污泥回流时较无污泥回流下降 30% 以上, 系统出水的色度比无污泥回流时降低 30% 左右. 回流剩余污泥使 A_1 段出水 pH 略低于无污泥回流的情况, 但对 A_2 段和 O 段 pH 值影响不大. 在有剩余污泥回流的系统中, 系统各段出水的 SS 浓度均比无回流系统大. 长期污泥回流会造成系统内难生物降解物质的积累, 必须适时地进行排泥、气水冲刷等恢复系统污泥活性的措施.

关键词:水解酸化; 好氧氧化; 污泥减量; $A_1/A_2/O$ 生物处理系统; 碱减量印染废水

中图分类号: X791; X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2007)06-1280-05

Running Effects Affected by Sludge Reducing by Anaerobic Hydrolysis-acidification and Aerobic Oxidation Process of $A_1/A_2/O$ Bio-treatment System

YANG Bo¹, CHEN Ji-hua¹, XI Dan-li¹, LI Fang¹, TIAN Qing¹, XU Shi-liang²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the $A_1/A_2/O$ bio-treatment system dealing with alkali minimization and dyeing-printing wastewater, residual sludge could be reduced effectively by recycling of sludge. The COD removal rate in A_1 segment could be improved by residual sludge recycling to A_1 segment. The COD elimination rate in A_1 segment was raised from 15.9% to 23.9% and from 12.3% to 22.8% while the COD volume loading of A_1 segment was $2.54 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ and the HRT of A_1 was 9.45 h and 7.56 h respectively. The recycling of sludge is useful to color removal of the system. When the COD of influxion was $1\,000 \text{ mg/L}$, the COD volume loading of A_1 was $2.54 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, the chroma of influxion was 450 and the temperature of the system was 30°C , the chroma removal rate with sludge recycling decreased more than 30% and about 30% compared with the system without sludge recycling in A_1 segment and in the whole process respectively. The pH in A_1 segment with sludge recycling was a little lower than that without sludge recycling, but the performance of A_2 and O segments was affected less severely by sludge recycling. The SS in every segment with sludge recycling was higher than that without sludge recycling. Inert substance could be accumulated because of long time sludge recycling and it's necessary to activate the sludge by aerating and washing.

Key words: hydrolysis-acidogenesis; aerobic oxidation; sludge reducing; $A_1/A_2/O$ bio-treatment system; alkali minimization and dyeing-printing wastewater

通过各种工艺手段在系统内实现剩余污泥减量, 是剩余污泥处理与处置的有效方法^[1-11]. 在碱减量印染废水 $A_1/A_2/O$ 生物处理系统中, 将剩余污泥回流到 A_1 段, 可通过水解酸化、好氧氧化作用把剩余污泥有效地减量于废水处理系统中; $A_1/A_2/O$ 厌氧水解酸化-好氧氧化剩余污泥减量系统, 是回流剩余污泥水解、“液化”、再降解和好氧污泥产率系数降低共同作用的结果^[12,13]. 但是, 工艺系统的首要目的仍是废水处理后的达标排放.

本研究通过有污泥回流和无污泥回流 $A_1/A_2/O$ 系统运行效果的对比, 针对废水处理系统 COD、色

度、pH 值等指标进行探讨, 研究系统内剩余污泥减量对废水处理效果的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置与试验流程

试验装置与流程见图 1.

碱减量印染废水由恒流泵提升至 1 号厌氧反应

收稿日期: 2006-11-29; 修订日期: 2007-01-17

基金项目: 上海市科委基金项目 (02DZ12096); 东华大学青年基金项目

作者简介: 杨波 (1973 ~), 男, 博士, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: yangbo@dhu.edu.cn

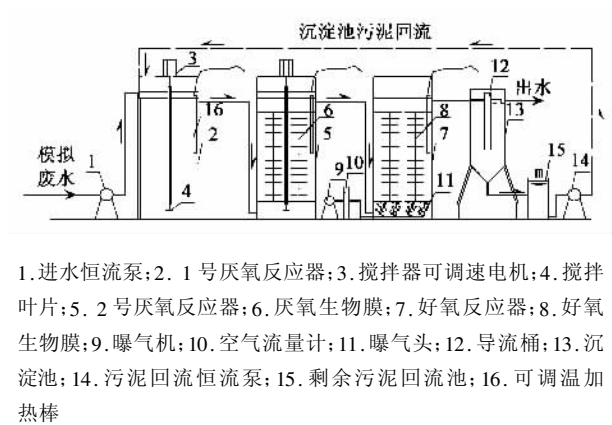


图 1 动态剩余污泥减量试验工艺流程

Fig.1 Diagram of dynamic residual sludge reducing experiment

器,出水从反应器的上部流出进入 2 号厌氧反应器,再从 2 号反应器上部流出,进入好氧反应器.1 号厌氧反应器采用活性污泥法,2 号厌氧反应器和好氧反应器采用生物膜法.好氧池出水在沉淀池中实现固、液分离,上清液排放,剩余污泥经恒流泵回流至 1 号厌氧反应器.

1 号、2 号厌氧反应器和好氧反应器简称为 A₁、A₂ 和 O,尺寸均为 15 cm×15 cm×39 cm,有效容积 7.875 L;厌氧反应器设置搅拌器,转速可调.

风机出口处设置流量计,通过阀门控制反应器中溶解氧浓度;为控制试验温度,A₁、A₂、O 段都设置可调温恒温棒.系统运行稳定后,每日校正系统温度、进水、DO 等各 2 次.

1.2 测试方法^[14,15]

COD、MLSS、色度、pH 值、温度等均采用标准分析方法进行测定.

2 结果与分析

2.1 污泥回流对 COD 去除率的影响

2.1.1 污泥回流对 A₁ 段反应器 COD 去除率的影响

回流污泥对 A₁ 段污泥量的补充和污泥活性的提高(增加了污泥 MLVSS 浓度),可以增加污泥对废水中污染物的去除;而作为水解、酸化的底物,回流污泥将增加 A₁ 段的有机负荷.试验开始时 A₁ 段的污泥浓度(MLSS)为 5.50 g/L,每组试验进行 2 周,回流污泥定量为 5 L,试验温度 30℃.

对回流污泥的 COD/MLSS(干污泥)值进行测定,其平均值为 1.360.在忽略新增殖微生物假设条件下,有污泥回流系统的回流污泥贡献的 COD 按下式计算:

消减污泥贡献的 COD =

污泥在 A₁ 中的消减量 × 1.360
回流污泥的体积 + 进入系统废水的体积 (1)

式(1)中污泥在 A₁ 段消减量为回流污泥总量、A₁ 段污泥总量在试验开始和结束时差值的代数和.

在忽略 A₁ 段合成污泥量的假设条件下,无污泥回流系统消减污泥贡献的 COD 按下式计算:

消减污泥贡献的 COD =

污泥在 A₁ 中的消减量 × 1.360
进入系统废水的体积 (2)

式(2)中污泥在 A₁ 段消减量为试验结束时 A₁ 段中污泥总量与试验开始时 A₁ 段中污泥总量的差值.

反应器中总的 COD 去除率按下式计算:

A₁ 中总 COD 去除率 =

$$\left[1 - \frac{\text{出水 COD}}{\text{进水 COD} + \text{消减污泥贡献的 COD}} \right] \times 100\%$$
 (3)

表 1 是 A₁ 段 COD 容积负荷为 2.54 kg/(m³·d)、水力停留时间(HRT)分别为 9.45 h 和 7.56 h 时有污泥回流和无污泥回流条件下 A₁ 段 COD 的去除情况.试验结束时,水力停留时间为 9.45 h 的有污泥回流系统 A₁ 段污泥浓度为 5.14 g/L,无污泥回流系统 A₁ 段污泥浓度为 4.20 g/L;水力停留时间为 7.56 h 的有污泥回流系统 A₁ 段污泥浓度为 5.50 g/L,没有污泥回流系统 A₁ 段污泥浓度为 4.50 g/L.

由表 1 可见,在进水 COD 浓度为 1 000 mg/L 的情况下,有污泥回流系统 A₁ 段出水 COD 浓度为 943 mg/L,高于无污泥回流的 872 mg/L,污泥的回流导致了 A₁ 段出水 COD 浓度的提高.有污泥回流情况下 COD 的去除率为 23.9%,比无污泥回流情况下的 15.9% 大大提高,意味着污泥的回流虽然增加了 A₁ 段中污泥的有机负荷,但是也提高了系统对 COD 的去除率.在厌氧系统中,在一定范围内系统的 COD 浓度越高,水解酸化作用越明显.有剩余污泥回流的情况下,大量的回流污泥在 A₁ 段中发生水解、“液化”,增加系统中生化性能好的溶解性有机物浓度,改善废水的可生化性,A₁ 段对 COD 的去除率较无剩余污泥回流时提高.

在 HRT = 7.56 h、进水 COD 浓度为 800 mg/L 的情况下,有污泥回流系统的 A₁ 段出水 COD 浓度为 780 mg/L,高于无污泥回流的 720 mg/L,有污泥回流情况 A₁ 段 COD 去除率为 22.8%,比无污泥回流情况下的

表 1 A₁ 段反应器 COD 去除情况对比

Table 1 Comparison of COD removal rate in A₁ segment

项 目	9.45 h		7.56 h	
	无污泥回流	有污泥回流	无污泥回流	有污泥回流
进水 COD 浓度/mg•L ⁻¹	1 000	1 000	800	800
回流污泥量/g•d ⁻¹	0	3.71	0	4.17
A ₁ 段污泥浓度减少量/g•L ⁻¹	1.30	0.36	1.00	0
消减污泥产生的 COD 浓度/mg•L ⁻¹	29.3	209.9	23.1	142.5
进入 A ₁ 段总 COD 浓度/mg•L ⁻¹	1 036.6	1 238.6	821.4	1 011.0
出水 COD/mg•L ⁻¹	872	943	720	780
总 COD 去除率/%	15.9	23.9	12.3	22.8

12.3%大大提高.污泥回流虽然增加了 A₁ 段中污泥的有机负荷.却提高了系统对 COD 的去除效率.

有污泥回流条件下,水力停留时间为 9.45 h、7.56 h 的 A₁ 段中污泥浓度变化趋势的不同:前者 A₁ 段的污泥浓度下降了,而后者污泥浓度基本保持平衡.污泥的水解、减量同系统有机物浓度、污泥浓度密切相关,污泥回流同时影响着 A₁ 段 COD 降解速率和污泥“液化”减量效率. A₁ 段原有的污泥浓度、回流污泥量、进水 COD 浓度等,存在着复杂的相互关系.

综上所述,回流的剩余污泥一方面由于被水解、减量,A₁ 段出水的 COD 浓度有所上升,而 A₁ 段系统 COD 浓度的上升反过来又促进了污泥的水解、减量;另一方面,部分回流污泥补充到 A₁ 段中有助于维持系统的污泥浓度,进而提高 A₁ 段对 COD 的去除率.在系统可以承受的范围内,随着污泥回流量的增加,回流污泥增加了系统 A₁ 段 COD 的去除率.

上述讨论忽略了 A₁ 段中增殖的微生物,实际上 A₁ 段污泥在对有机物进行降解的同时,自身也得到了增殖,表 1 中消减的污泥没有包括增殖的微生物在内,因此在考虑实际增殖的微生物后, A₁ 段实际消解的污泥量要大于上表中的数值.

2.1.2 污泥回流对整个系统 COD 去除率的影响

剩余污泥回流提高了 A₁ 段 COD 去除率,同时造成了 A₁ 段出水 COD 浓度普遍升高, A₂ 段和 O 段 COD 去除率也不可避免地受到污泥回流的影响.

表 2 为 A₁ 段 COD 容积负荷为 2.54 kg/(m³•d)、水力停留时间为 9.45 h 条件下有污泥回流和无污泥回流 2 种条件下反应器 COD 去除情况.

由表 2 可见,如果不考虑消减的回流剩余污泥量,有污泥回流系统 A₁ 段对 COD 的去除率小于无污泥回流系统的 A₁ 段对 COD 的去除率,但根据表 1,考虑到被消减污泥产生的 COD 后,有污泥回流系

统 A₁ 段对 COD 的去除率大于无污泥回流系统的 A₁ 段 COD 去除率.有污泥回流系统 A₁ 段出水 COD 浓度高,但是污泥回流保证了 A₁ 段污泥浓度,废水中难降解物质得到了初步的降解, A₁ 段出水的可生化性提高,废水在 A₂ 段 COD 去除效率较无污泥回流时有所增加,两者 A₂ 段出水 COD 浓度已经较为接近.废水进入 O 段后,无污泥回流系统 O 段出水效果要略好于有污泥回流系统,系统最终出水 COD 值较为接近.但是有污泥回流系统污泥的水解在 A₁ 段产生了大量惰性物质,会影响系统微生物的活性,随着系统运行时间的增加,这种现象会更加明显.

表 2 有、无污泥回流时反应器各段 COD 去除情况对比

Table 2 Comparison of COD removal rate in every segments when HRT = 9.45 h under different conditions with or without sludge recycling		
项目	有污泥回流	无污泥回流
进水 COD 浓度/mg•L ⁻¹	1 000	1 000
A ₁ 段出水 COD 浓度/mg•L ⁻¹	943	872
A ₁ 段 COD 去除率/%	5.7	12.8
A ₂ 段出水 COD 浓度/mg•L ⁻¹	720	700
A ₂ 段 COD 去除率/%	23.6	19.7
O 段出水 COD 浓度/mg•L ⁻¹	65	58
O 段 COD 去除率/%	91.0	91.7

从以上分析可知,污泥回流对系统 A₁ 段、A₂ 段、O 段的 COD 去除效率都会造成一定的影响,其中对 A₁ 段的影响最大.由于 A₂ 段和 O 段生物膜具有较大的耐冲击负荷能力,对它们影响并不大,但是长期污泥回流会造成系统内难生物降解物质的累积,对系统污染物去除效果影响会增加,应该进行必要的排泥、气水冲刷等恢复系统污泥活性的措施.

2.2 污泥回流对脱色去除的影响

碱减量印染废水所具有的色度是由染料分子引起的,染料分子主要的发色基团有偶氮基、亚硝基、硝基、氧化偶氮基等^[16]. 本次研究所采用的水解酸化工艺和生物接触氧化法都具有较强的脱色能力,

各反应器中的微生物首先对废水中的染料分子进行吸附,并在微生物所分泌的酶的作用下,使染料分子发生电子转移,不饱和共价键被打开,染料分子转变为具有更低电势的自由基,从而实现对染料分子的降解^[17~22]。

对有污泥回流和无污泥回流反应器各段脱色情况进行比较.实验控制进水 COD 浓度 1 000 mg/L, A₁ 段 COD 容积负荷为 2.54 kg/(m³·d),进水色度 450 倍,系统温度 30℃,结果如表 3 所示.

表 3 有、无污泥回流系统反应器各段出水色度比较

Table 3 Comparison of chroma removal in every segment under different conditions with or without sludge recycling

类别	进水色度/倍	A ₁ 段出水色度/倍	A ₂ 段出水色度/倍	O 段出水色度/倍
无污泥回流	450	280~310	110~130	30~40
有污泥回流	450	180~200	90~110	20~30

由表 3 可见,由于剩余污泥的回流使 A₁ 段色度去除率的大幅提升,A₁ 段出水的色度比无污泥回流的下降了 30% 以上.在 A₁ 段反应器中,废水中染料分子与污泥发生碰撞并被吸附,随后在水解、酸化菌的作用下,染料分子的不饱和共价键被打开,从而达到脱色的效果.在有污泥回流的情况下,回流污泥提高了 A₁ 段对废水中染料分子的吸附和降解作用,从而提高了 A₁ 段对色度去除率.虽然后续的 A₂ 段与 O 段反应器的色度去除率有所降低,但是最终出水色度比无污泥回流时要低 10~15 倍,降低了 30% 左右.综上所述,较无污泥回流系统,回流剩余污泥可以有效提高系统对色度的去除效果,使最终出水的色度平均值从 35 倍下降到 25 倍左右.

2.3 污泥回流对系统 pH 的影响

微生物对有机物的氧化分解是在酶作用下进行的,而酶反应需要合适的 pH 值条件,否则将抑制微生物的新陈代谢,因此 pH 值的平衡对于废水处理十分关键^[23,24].对于本研究中的厌氧-好氧生化系统来说,其中的 A₁ 段和 A₂ 段主要是水解、产酸细菌发生作用,它们多属于兼性菌,有较强 pH 适应能力^[25].

试验直接以 pH 值为 10~10.5 的废水进入系统进行处理.表 4 是在系统 A₁ 段 COD 容积负荷为 2.54 kg/(m³·d)、废水在各段水力停留时间为 7.56 h 条件下,有污泥回流和无污泥回流 2 种情况各段反应器出水 pH 值的变化比较.

由表 4 可见,废水在系统中 pH 值变化是先下降再上升的过程.在 A₁ 段水解酸化作用下,废水中大分子有机物被水解产生小分子的脂肪酸,A₁ 段出水

的 pH 下降;废水进入 A₂ 段反应器后,有机物在产酸细菌的作用下被进一步分解为 2 个碳或 3 个碳的有机酸,而小分子有机酸也是微生物的代谢底物,A₂ 段 pH 值回升了 0.2~0.4 个 pH 单位. pH 值在 7.0 左右的废水进入好氧反应器,发生一系列生化反应将小分子有机酸彻底分解为 CO₂ 和 H₂O 等无机物,系统最终出水的 pH 值为 7.5~8.2.

表 4 系统 pH 值变化情况比较

Table 4 Comparison of pH in every segment under different conditions with or without sludge recycling

类别	进水 pH	A ₁ 段出水 pH	A ₂ 段出水 pH	O 段出水 pH
无污泥回流	10~10.5	6.7~7.2	6.9~7.4	7.6~8.2
有污泥回流	10~10.5	6.6~7.0	6.8~7.2	7.5~8.2

表 4 对有污泥回流和无污泥回流系统 pH 变化情况进行了比较,可以看出污泥回流对系统 pH 值变化影响并不大,只是使 A₁ 段出水的 pH 值略有下降,对 A₂ 段和 O 段 pH 值影响不大.回流的剩余污泥在 A₁ 段中的水解增加了 A₁ 段中有机酸的浓度,使出水 pH 略低于无污泥回流的情况.但是,A₂ 段生物膜和 O 段生物膜高浓度的微生物具有很强的耐冲击负荷作用,A₁ 段中产生的 pH 值差别在 A₂ 中几乎反应不出,有污泥回流和无污泥回流对 A₂ 段和 O 段的 pH 值影响不大.

因此,剩余污泥的回流对厌氧-好氧生化系统的最终出水的 pH 值无明显影响,系统能够实现对 pH 值的平衡,使出水 pH 值满足达标排放要求.

2.4 污泥回流对系统 SS 的影响

在有剩余污泥回流系统中,回流进入 A₁ 段的污泥在水解产酸菌的作用下分解,产生大量的细小絮体颗粒,其中少量颗粒会在水流的冲刷下随废水流出 A₁ 段,从而造成了 A₁ 段出水 SS 浓度从无污泥回流时的 35 mg/L 提高到 90 mg/L.

对于 A₂ 段,无污泥回流系统 A₂ 段出水 SS 浓度为 40 mg/L,有污泥回流系统的 A₂ 段出水 SS 浓度为 65 mg/L,它们比 A₁ 段出水的 SS 浓度都要有所上升.从前面的讨论可知,在 A₂ 段同样存在着污泥的减量,污泥水解产生的惰性颗粒造成出水 SS 浓度升高.在有污泥回流系统,由于污泥回流造成 A₁ 段出水 COD 浓度升高,A₂ 段微生物通过共代谢等作用,提高了对 SS 的水解率,因此其浓度较无污泥回流系统下降得要多.

从 A₂ 段进入 O 段废水在好氧条件下,有污泥

回流 O 段出水 SS 浓度为 40 mg/L, 高于无污泥回流系统 O 段出水 SS 的 30 mg/L 质量浓度, 但它们都小于 70 mg/L 的一级排放标准.

由此可见, 污泥回流对系统各段的 SS 浓度都有影响. 短时间运行系统出水 SS 浓度虽然会增加, 但仍可以满足排放的要求; 但长时间运行, 系统内惰性颗粒逐渐累积, 出水 SS 浓度最终将超过排放标准要求. 因此, 必须适时对系统进行排泥、气水冲刷等恢复污泥活性的措施, 保证系统正常运行和满意的污泥减量化效果.

3 结论

(1) 剩余污泥回流到 A_1 段, 虽然增加了 A_1 段中污泥的有机负荷, 却提高了系统对 COD 的去除率. 在 A_1 段 COD 容积负荷为 $2.54 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、水力停留时间为 9.45 h 条件下, A_1 段 COD 的去除率由 15.9% 提升至 23.9%; 在 A_1 段有机负荷 $2.54 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、水力停留时间为 7.56 h 条件下, A_1 段 COD 的去除率由 12.3% 提升至 22.8%. A_2 段和 O 段生物膜的耐冲击负荷能力强, 污泥回流对 A_2 段和 O 段的影响较 A_1 段为小.

(2) 污泥回流有助于系统对色度的去除. 在进水 COD 浓度 1 000 mg/L、 A_1 段 COD 容积负荷 $2.54 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、进水色度 450 倍、系统温度 30℃ 条件下, 剩余污泥的回流使 A_1 段色度去除率的大幅提升, A_1 段出水的色度比无污泥回流时下降 30% 以上, O 段出水的色度比无污泥回流时降低 30% 左右.

(3) 污泥回流对系统 pH 值影响不大. 污泥回流使 A_1 段出水 pH 略低于无污泥回流的情况, 但对 A_2 段和 O 段 pH 值影响不大.

(4) 污泥回流会对系统各段出水的 SS 浓度产生影响, 在有剩余污泥回流的系统中, 系统各段出水的 SS 浓度都要比无回流的系统大.

(5) 长期的污泥回流会造成系统内难生物降解物质的积累, 对系统 COD 去除效果的影响会增加, 必须适时进行排泥、气水冲刷等恢复系统污泥活性的措施, 保证系统正常运行和满意的污泥减量化效果.

参考文献:

[1] Nolasco M, Campos A, Springer A, *et al.* Use of lysis and recycle to control excess sludge production in activated sludge treatment: bench scale study and effect of chlorinated organic compounds[J]. Water Sci Technol, 2002, **46**(10): 55 ~ 61.

[2] Rocher M, Goma G, Pilas A, *et al.* Towards a reduction in excess sludge production in activated sludge processes: biomass physicochemical treatment and biodegradation[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1999, **51**(10): 883 ~ 890.

[3] Saby S, Djafer M, Chen G. Effect of low ORP in anoxic sludge zone on excess sludge production in oxic-settling anoxic activated sludge process[J]. Water Res, 2003, **37**(1): 11 ~ 20.

[4] Liu Y. Effect of chemical uncoupler on the observed growth yield in batch culture of activated sludge[J]. Water Res, 2000, **34**(7): 2025 ~ 2030.

[5] Strand S E, Harem G N, Stensel H D. Activated-sludge yield reduction using chemical uncouplers[J]. Water Environ Res, 1999, **71**(4): 454 ~ 458.

[6] Ahn K, Park K, Maeng S, *et al.* Ozonation of wastewater sludge for reduction and recycling[J]. Water Sci Technol, 2002, **46**(10): 71 ~ 77.

[7] Egeman E, Corpening J, Pdilla R, *et al.* Evaluation of ozonation and crypical growth for biosolids management in wastewater treatment[J]. Water Sci Technol, 1999, **39**(10, 11): 155 ~ 158.

[8] Ghyyot W, Verstraete W. Reduced sludge production in a two-stage membrane-assisted bioreactor[J]. Water Res, 1999, **34**(1): 205 ~ 215.

[9] Rensink J, Rulkens W. Using metazoa to reduce sludge production[J]. Water Sci Technol, 1997, **36**(11): 171 ~ 179.

[10] Deleris S, Geauey V, Camacho P, *et al.* Minimization of sludge production in biological processes: an alternative solution for the problem of sludge disposal[J]. Water Sci Technol, 2002, **46**(10): 63 ~ 70.

[11] Sakai Y, Aoyagi T, Shiota N, *et al.* Complete decomposition of biological waste sludge by thermophilic aerobic bacteria[J]. Water Sci Technol, 2000, **42**(9): 81 ~ 88.

[12] 杨波, 陈季华, 奚旦立, 等. 厌氧水解酸化-好氧氧化 $A_1/A_2/O$ 工艺剩余污泥减量[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 478 ~ 482.

[13] 杨波, 陈季华, 奚旦立, 等. 厌氧水解酸化-好氧氧化 $A_1/A_2/O$ 工艺剩余污泥减量影响因素[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 675 ~ 680.

[14] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 2004. 549 ~ 567.

[15] 奚旦立. 环境工程手册(环境监测卷)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 281 ~ 404.

[16] 郑冀鲁, 范娟, 阮复昌. 印染废水脱色技术和理论评述[J]. 环境污染治理技术和设备, 2000, **1**(5): 29 ~ 35.

[17] 夏北成. 环境污染生物降解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 51 ~ 58.

[18] 徐向阳, 张明洲, 俞秀娥. 高效脱色菌的特性及其在染化废水厌氧处理中的强化作用[J]. 中国沼气, 2001, **19**(2): 2 ~ 6.

[19] 郭茂新, 余逢中, 张砺彦, 等. 接触氧化工艺处理印染纺织废水的生产性试验[J]. 环境科学, 1997, **18**(4): 56 ~ 58.

[20] 贾晋芬, 刘志培, 杨惠芳. 厌氧-好氧投菌法处理印染废水[J]. 环境科学, 1992, **13**(5): 20 ~ 24.

[21] Bedilli M I, Pavlostathis S G, Tincher W C. Biological decolorization of the azo dye reactive red 2 under various oxidation-reduction conditions[J]. Water Environ Res, 2002, **76**(2): 698 ~ 705.

[22] Stern S R, Szpyrkowicz L, Rodighiero I. Anaerobic treatment of textile dyeing wastewater[J]. Water Sci Technol, 2003, **47**(10): 55 ~ 59.

[23] 许保玖, 龙腾锐, 孟宪庭, 等. 当代给水排水原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991. 272 ~ 275.

[24] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2001. 124 ~ 126.

[25] 沈耀良, 王宝贞. 水解酸化工艺及其应用研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, **32**(6): 35 ~ 38.