

DAT-IAT 工艺处理城市污水的生态风险评估

朱爽¹, 华涛¹, 周启星^{1, 2*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016)

摘要:采用常规水质指标检测和种子发芽及根伸长抑制的陆生生态毒理方法, 评价了 DAT-IAT 工艺处理过程中各工艺阶段污水的生态风险. 常规水质指标检测结果显示, COD 和 SS 可以达标排放, 而氮的形态由进水时的 NH_4^+ -N 转变为 DAT、出水中的 NO_3^- -N, 只是形态发生了变化, 并没有从污水中去除, 虽然达到了设计的 NH_4^+ -N 去除要求, 可以达标排放, 但是并未降低受纳水体发生富营养化的生态风险. 生态毒理指标检测结果显示, 进水、DAT、出水各阶段污水中 COD 对小麦种子发芽的半数抑制浓度逐渐降低, 分别为 249.3、165.3 和 161.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 对小麦根伸长的半数抑制浓度也逐渐降低, 分别为 257.6、154.0 和 142.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明 DAT-IAT 工艺处理过程中污水的生态毒性变化趋势为逐渐增大, 处理后的出水存在一定的生态风险, 有进一步进行生态风险调控的必要性. 在相同水质条件下, 小麦根伸长抑制率比小麦种子发芽抑制率更显著, 可以把小麦根伸长作为评价污水处理生态风险的敏感指标之一.

关键词:生态风险; DAT-IAT 工艺; 常规水质指标; 种子发芽; 根伸长; 抑制率

中图分类号: X820.4; X826 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0391-05

Ecological Risk Assessment of the DAT-IAT Process for Municipal Wastewater Treatment

ZHU Shuang¹, HUA Tao¹, ZHOU Qi-xing^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria at Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: By using the regular water-quality indices and the terrestrial ecotoxicological methods of inhibiting seed germination and root elongation, the ecological risk of the DAT-IAT process for municipal wastewater treatment was assessed. The results of regular water-quality indices determination showed that COD and SS in treated wastewater by the DAT-IAT process could attain the National Integrated Wastewater Discharge Standard. Although NH_4^+ -N could also meet the standard, most of nitrogen could not be removed out of the wastewater because of the N-form changing from NH_4^+ -N to NO_3^- -N. Thus, the ecological risk of eutrophication could not successfully be reduced. The results based on the determination of ecotoxicological indices showed that IC_{50} of COD in wastewater from inflow water, DAT and effluent toxic to the germination of wheat seeds decreased gradually. The IC_{50} of the inhibitory rate of seed germination was 249.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 165.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 161.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and the IC_{50} of the inhibitory rate of root elongation was 257.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 154.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 142.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. It thus revealed that the ecotoxicity of wastewater increased after treatment by the DAT-IAT process, which demanded more studies to address the regulation of the ecological risk. In particular, the inhibition of wheat root elongation was far more sensitive than the germination of wheat seeds under the same water-quality conditions. Thus, the root elongation could be recommended as a sensitive method to assess ecological risk of wastewater treatment effluents.

Key words: ecological risk; DAT-IAT process; regular water-quality indices; seed germination; root elongation; inhibitory rate

目前,我国城市污水处理厂主要采用活性污泥工艺,出水水质以 COD、 BOD_5 、SS、 NH_4^+ -N、总磷等常规指标的达标为目的.随着对城市污水处理及污水回用研究的深入,人们逐渐认识到城市污水处理厂的出水水质不应只满足于污染物的减量化,而应进一步到水质的无害化^[1,2].由于我国的城市污水主要是由生活污水和工业废水混合组成,含有大量的难以被活性污泥降解或去除的毒性物质.尽管这些污水经处理后一般都能达到设计排放标准,但是上述常规指标达到排放标准并不意味着出水水质已经达

到无害化^[3,4].因此,有必要对城市污水处理工艺进行生态风险评价,并从降低生态风险角度对其进行改进.目前这方面的研究已有一些报道^[5~7].

DAT-IAT(demand aeration tank-Intermittent aeration tank)法,即连续进水、连续-间歇曝气工艺,是 SBR 法继 ICEAS、CASS、CAST、IDEA 法之后不断完善发展

收稿日期: 2008-02-24; 修订日期: 2008-04-08

基金项目: 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(707011); 中国科学院陆地生态过程重点实验室项目

作者简介: 朱爽(1983~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染控制生态化学及水处理技术, E-mail: zhushuangnk@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhouqx523@yahoo.com

起来的一种新工艺^[8]. 1999 年建成的天津某污水处理厂(1.0×10^5 t/d)在国内首次采用了 DAT-IAT 工艺. 该工艺由 1 个连续曝气池 DAT 和 1 个间歇曝气池 IAT 串连而成, 在 IAT 完成反应、沉淀、出水工序, 具有稳定性高、容积利用率高、受负荷变化影响小、处理构筑物少、基建投资省等特点^[9,10], 应用前景十分广阔, 但目前对该工艺的研究只停留在常规指标的达标排放上^[11,12], 还没有从生态风险角度对其进行评估的报道.

1 材料与方法

1.1 供试材料

水样采自天津某污水处理厂, 从工艺的进水口(沉砂池入口)、DAT 池和出水口 3 个位置采样(见图 1). 供试作物为小麦(*Triticum aestivum*), 品种为春小麦品系 02K-53-12, 由天津农科院研究所提供种子.

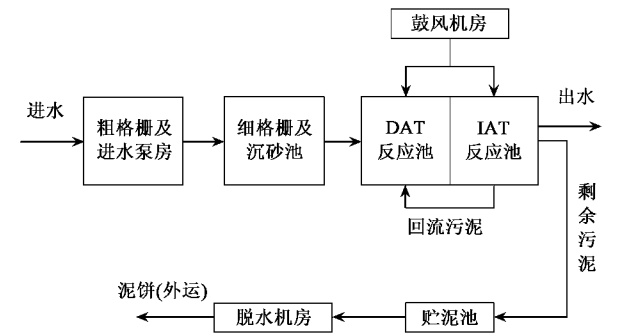


图 1 DAT-IAT 工艺流程
Fig. 1 Flow chart of the DAT-IAT process

1.2 常规指标测定方法

该厂 DAT-IAT 工艺的一个运行周期为 3 h, DAT 池连续曝气, IAT 池曝气、沉淀、排水各为 1 h. COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 SS 是该厂设计的达标排放指标. 由于该厂在此运行条件下对 BOD₅ 的去除十分彻底, 可达 96% 以上^[13], 完全能够满足设计排放标准, 故本实验不对 BOD₅ 进行测定. COD 的测定采用重铬酸钾法, NH₄⁺-N 的测定采用纳氏试剂光度法, SS 的测定采用重量法. 另外, 为了考察 DAT-IAT 工艺对造成水体富营养化的营养物质的去除, 本实验对磷和 NO₃⁻-N 也进行了测定. 污水中的磷主要是以溶解性磷酸盐形式存在, 故测定 PO₄³⁻-P, 采用钼锑抗分光光度法; 测定 NO₃⁻-N 以考察工艺中氮的转化途径和最终去除情况, 采用麝香草酚分光光度法.

1.3 小麦种子发芽和根伸长抑制试验

分别将进水、DAT 水和出水用蒸馏水稀释为原

水浓度的 20%、30%、45%、68% 和 100% 进行试验. 采用 9 cm 培养皿, 内铺 2 层滤纸, 预先加入 5 mL 相应浓度的稀释水样, 选择大小均匀的小麦种子用 2% H₂O₂ 消毒 15 min, 自来水、蒸馏水分别冲洗 3 次, 每皿 15 粒均匀摆放在滤纸上, 培养皿加盖后置于 25℃ ± 1℃ 的生化培养箱中在黑暗条件下培养, 每个浓度作 3 次重复. 当对照组发芽率 > 65%、根长达到 20 mm 时, 终止试验. 记录种子发芽数、测量根伸长情况, 并计算种子的发芽率和根伸长的抑制率. 采用 SPSS16.0 统计分析软件进行数据分析.

2 结果与分析

2.1 DAT-IAT 工艺对常规指标的去除效果评估

该污水处理厂在设计时共考虑 4 个常规指标, 分别为 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 SS. 除了 BOD₅ 本实验不进行测量外, 其余 3 个指标和 PO₄³⁻-P、NO₃⁻-N 的测定结果见表 1.

表 1 常规水质指标测定结果/mg·L ⁻¹				
Table 1 Determining results of regular water-quality indices/mg·L ⁻¹				
常规指标	进水	DAT 池	出水	设计排放标准
COD	264.18	136.00	116.01	120
NH ₄ ⁺ -N	18.50	未检出	未检出	10
SS	221.85	—	11.00	30
PO ₄ ³⁻ -P	1.89	0.66	0.66	未考虑
NO ₃ ⁻ -N	未检出	23.87	23.28	未考虑

从表 1 可以看出, 经过处理后, 污水中 COD、NH₄⁺-N 和 SS 都达到了设计排放标准. PO₄³⁻-P 由于在进水中含量不大, 经处理后可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级标准的 A 标准(1 mg·L⁻¹). NO₃⁻-N 在进水中未检出, 而出水浓度为 23.28 mg·L⁻¹, 这说明氮在 DAT-IAT 工艺中只是进行了硝化过程, 发生了从 NH₄⁺-N 到 NO₃⁻-N 的形态转化, 但并没有充分进行反硝化过程而脱离体系. 这与梁伟等^[14]的研究结果相似. 水体富营养化是由于过量的氮、磷等营养性物质进入湖泊、河口、海湾等缓流水体, 在适宜的环境下, 某些特征性藻类(主要是蓝藻、绿藻等)异常增殖, 使水体透明度下降、溶解氧降低、水质变坏、鱼类及其他生物大量死亡的现象^[15]. 污水经 DAT-IAT 工艺处理后, 由于排入到受纳水体的总氮的量没有减少, 并未降低受纳水体发生富营养化的生态风险.

生物脱氮是通过硝化和反硝化 2 个过程实现的^[16]. 硝化过程是在好氧条件下, 亚硝酸菌将 NH₄⁺-N 氧化为 NO₂⁻-N 和硝酸菌将 NO₂⁻-N 氧化成

NO_3^- -N 的反应. 亚硝酸菌和硝酸菌统称为硝化菌, 硝化菌主要是好氧自养菌. 所以在 DAT 池连续曝气的好氧条件下, NH_4^+ -N 可被迅速去除, 达到设计排放标准. 反硝化过程是在缺氧条件下, 反硝化菌将 NO_3^- -N 还原成气态氮(N_2 、 N_2O 或 NO) 的反应. 反硝化菌多数是异养型兼性厌氧菌. 在缺氧条件下, 反硝化菌以 NO_3^- -N 为电子受体, 以有机物为电子供体进行厌氧呼吸, 将 NO_3^- -N 还原为气态氮, 同时降解有机物. 而当分子态氧和 NO_3^- -N 同时存在时, 反硝化菌优先进行有氧呼吸; 氧的存在还会抑制硝酸盐还原酶的形成, 阻碍硝酸盐的还原, 所以反硝化过程应在缺氧条件下进行^[17]. 但是 DAT-IAT 工艺中没有专门的缺氧构筑物, 只是在 IAT 池排水阶段末期短暂达到缺氧-厌氧状态, 污水在此阶段停留时间较短, 并且由于 DAT 池和 IAT 池的曝气作用, 使易生物降解的有机物已经基本被消耗完, 剩余的不易生物降解的有机物不能作为电子供体, 这就使反硝化过程无法充分进行, 导致脱氮效果有限. 如果在工艺前端增加厌氧池, 即 A/DAT-IAT 工艺^[18], 或者增设后续深度处理设施(如生物膜反应器^[19]), 使反硝化过程能够充分进行, 从而使氮得以脱离体系, 就可减轻受纳水体接受 NO_3^- -N 的负荷, 降低发生水体富营养化的生态风险. 其具体措施和操作条件有待进一步的研究.

2.2 DAT-IAT 工艺对毒性指标的去除效果评估

2.2.1 DAT-IAT 工艺不同阶段对小麦种子发芽的抑制效应

按概率单位回归法进行回归分析(图 2)可以看出, 小麦发芽抑制率的概率单位与进水、DAT 水和出水中 COD 浓度对数均呈线性正相关关系($p <$

0.05). 同时用概率单位法回归分析得到回归方程及相应的半数抑制浓度 IC_{50} , 结果见表 2. 其中, 进水、DAT 水与出水中 COD 对小麦种子发芽的半数抑制浓度分别为 249.31、165.30 和 161.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可见进水 COD 较 DAT 水、出水中 COD 对小麦种子发芽的半数抑制浓度相差较大, 即进水毒性较小. 而 DAT 水和出水中 COD 对小麦种子发芽的半数抑制浓度值相差不大, 且出水略低于 DAT 水, 即出水毒性略有增加. 同时, 由图 2 亦可见, 进水概率单位拟合直线位置低于 DAT 水和出水概率单位拟合直线的位置, 据此可初步判定, 3 个阶段水对小麦种子发芽的毒性大小为: 出水 > 进水, DAT > 进水, 处理后出水的毒性有所增加.

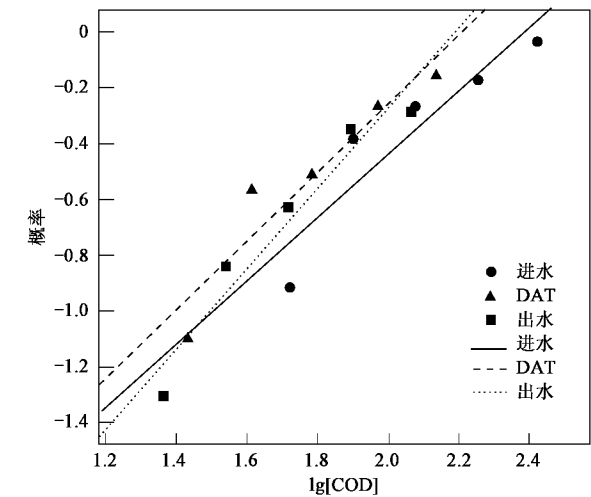


图 2 DAT-IAT 工艺不同阶段水质对小麦发芽的抑制效应
Fig.2 Inhibitory effect of water quality from the DAT-IAT process on the germination of wheat seeds

表 2 DAT-IAT 工艺不同阶段水质对小麦发芽的抑制效应			
Table 2 Inhibitory effect of water quality from the DAT-IAT process water on the germination of wheat seeds			
项目	进水	DAT	出水
$\text{IC}_{50}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	249.31	165.30	161.16
95% 置信限	185.14 ~ 461.78	118.65 ~ 331.68	116.05 ~ 308.80
线性回归方程	$y = -2.593 + 1.082x$	$y = -2.636 + 1.188x$	$y = -3.032 + 1.374x$
相关系数(R^2)	0.854	0.895	0.939

这是由于污水经过处理后, 易生物降解的 COD 被去除, 而难生物降解的 COD 成为 DAT 水和出水中 COD 的主要成分. 这部分 COD 浓度虽然已经符合设计排放标准, 但是污水对小麦发芽的抑制效应反而增加. 分析原因, 种子萌发的过程是一个非常活跃的植物胚胎生长发育过程, 其间有许多酶的参与, 难生物降解的 COD 中可能含有有毒或者能抑制生物生

长的物质, 从而使得有机物不能快速的降解, 如含有多环芳烃、有机染料等有毒难降解有机污染物, 具体成分需进一步研究确定. 已有研究表明此类污染物会对植物胚胎生长发育过程中酶的活性产生影响, 进而影响种子的芽长和根伸长^[20,21]. 这说明 DAT-IAT 工艺在此条件下运行对难生物降解的 COD 去除效果不理想, 剩余的难生物降解的 COD 对小麦发芽

具有较大的生物毒性,污水经该工艺处理后生态风险增大.

2.2.2 DAT-IAT 工艺不同阶段对小麦根伸长的抑制效应

按概率单位回归法进行回归分析(图 3)可以看出,小麦根伸长抑制率的概率单位与进水、DAT 水和出水中 COD 浓度对数均呈线性正相关关系($p < 0.05$).同时用概率单位法回归分析得到回归方程及相应的半数抑制浓度 IC_{50} ,结果见表 3. 其中,进水、DAT 水与出水中 COD 对小麦根伸长的半数抑制浓度分别为 257.60、154.03 和 142.07 $mg \cdot L^{-1}$,可见进水 COD 相对于 DAT 水、出水中 COD 对小麦根伸长的半数抑制浓度较大,这一点与种子发芽实验结论相同,即进水毒性较小;而 DAT 水和出水中 COD 对小麦根伸长的半数抑制浓度值相差不大,且出水略低于 DAT 水,即出水毒性略有增加.同时 3 条拟合直线的斜率以进水拟合直线最小,为 0.718, DAT 水和出水 COD 对应的拟合直线斜率分别为 0.751 和 0.752,可见进水 COD 浓度变化对小麦根伸长抑制率的变化影响较小,即进水 COD 浓度变化引起的毒性变化较小,亦可理解为进水毒性较小.DAT 水和出水 COD 浓度变化对小麦根伸长抑制率的影响较大且相近,亦可理解为毒性较大.同时,由图 3 可见,进

水概率单位拟合直线位置低于 DAT 水和出水概率单位拟合直线的位置,并且 DAT 水概率单位拟合直线位置低于出水概率单位拟合直线的位置.据此可初步判定,3 个阶段水对小麦根伸长的毒性大小为:出水 > DAT > 进水,处理后出水的毒性有所增加.分析原因与污水对小麦发芽抑制效应相同.

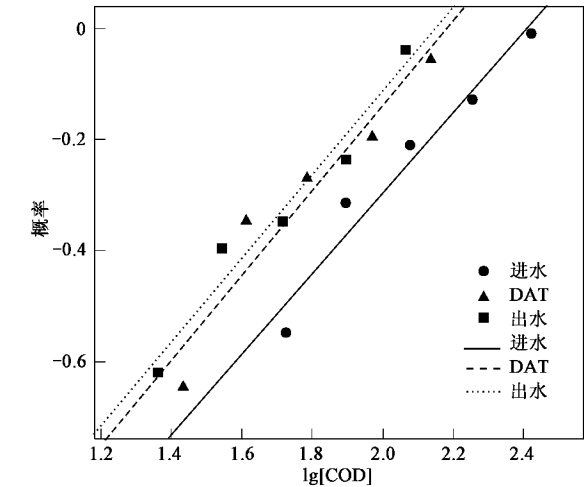


图 3 DAT-IAT 工艺不同阶段水质对小麦根长的抑制效应
Fig.3 Inhibitory effect of water quality from the DAT-IAT process on the elongation of wheat roots

表 3 DAT-IAT 工艺不同阶段水质对小麦根伸长的抑制效应			
Table 3 Inhibitory effect of water quality from the DAT-IAT process on the elongation of wheat roots			
项目	进水	DAT	出水
$IC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	257.60	154.03	142.07
95% 置信限	169.78 ~ 1 060.38	98.96 ~ 686.73	89.25 ~ 711.62
线性回归方程	$y = -1.731 + 0.718x$	$y = -1.644 + 0.751x$	$y = -1.618 + 0.752x$
相关系数(R^2)	0.958	0.915	0.957

2.2.3 综合比较

毒性实验表明,小麦根伸长毒性实验较发芽毒性实验对毒性变化敏感,由表 2 与表 3 中各直线的相关系数可以看出,小麦根伸长抑制率与工艺各阶段 COD 浓度的相关性比小麦种子发芽抑制率与工艺各阶段 COD 浓度的相关性要好.这可能是由于种子发芽除了从生长基质中摄取必需养分外,还可从胚内获得养分供应.而根生长的全过程受生长基质直接影响,对生长基质的污染更敏感.

另外,由表 2 与表 3 还可以看出,进水对小麦根伸长的抑制程度略低于对小麦种子发芽的抑制程度(进水 IC_{50} 分别为 257.60 和 249.31 $mg \cdot L^{-1}$),而 DAT 水和出水对小麦根伸长的抑制程度高于对小麦种子

发芽的抑制程度(DAT 水 IC_{50} 分别为 154.03 和 165.30 $mg \cdot L^{-1}$,出水 IC_{50} 分别为 142.07 和 161.16 $mg \cdot L^{-1}$).这是由于进水中含有大量的易被生物降解的 COD,可以作为植物生长的营养物质,故对小麦根伸长的抑制程度较小,低于对小麦种子发芽的抑制程度.而 DAT 水和出水中的 COD 难被生物降解,不易被植物利用,毒性表现比进水更明显,故对小麦根伸长的抑制程度大,高于对小麦种子发芽的抑制程度.这也验证了根对污水的毒性更敏感的结论.因此小麦根伸长可以作为评价城市污水处理厂污水处理工艺对污水毒性削减能力的一个较敏感的指标,并为工艺的设计和运行条件的优化提供参考.

难生物降解的 COD 积累,是导致出水毒性增大

的主要原因, DAT-IAT 工艺缺少厌氧、缺氧构筑物,如果在工艺前段增加厌氧池(A/DAT-IAT 工艺),使难生物降解的 COD 在厌氧池进行水解酸化^[22],转变为易被生物利用的有机物,就可降低污水的毒性.其具体措施和操作条件有待进一步的研究.另外,投加絮凝剂也可去除一定量的难生物降解 COD,即可降低污水中 COD 的毒性.关于絮凝剂的生态毒性效应已见报道^[4,23~28],但研发生态安全型絮凝剂及其推广应用仍需要进一步的工作.

3 结论

(1) 污水经 DAT-IAT 工艺处理后 COD、NH₄⁺-N、SS 可达标排放,但是其中 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N,并没有从体系中去除,污水经处理后并未降低受纳水体发生富营养化的生态风险.

(2) DAT-IAT 工艺各阶段 COD 浓度对小麦种子发芽和根伸长的抑制程度从高到低依次为出水 > DAT > 进水.说明污水经该工艺处理后,毒性增大,生态风险增大.

(3) 小麦根伸长可以作为评价污水处理工艺生态毒性效应的一个较敏感的指标,用于生态风险评估.

(4) 应对 DAT-IAT 工艺从氮的去除和毒性削减两方面进行改进,以提高该工艺的生态安全性,其具体改进措施有待于进一步研究.

参考文献:

[1] Ono Y, Somiya I, Kawaguchi T. Evaluation of toxic substances in effluents from a wastewater treatment plant[J]. Desalination, 1996, **106**(1): 255-261.

[2] 马梅,王毅,王子健. 城市污水生物处理过程中有毒有机污染物浓度及毒性变化的规律[J]. 工业水处理, 1999, **19**(6): 9-12.

[3] 程静,金洪钧,沈毅,等. 毒性鉴别评价方法对城镇污水处理厂去除水中有毒物质的分析实例[J]. 环境化学, 2001, **20**(5): 490-496.

[4] Maltby L, Clayton S A, Yu H, *et al.* Using single-species toxicity testes, community-level responses, and toxicity identification evaluation to investigate effluent impacts [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, **19**(1): 151-157.

[5] 王丽莎,张彤,胡洪营. 污水氯、二氧化氯消毒处理中水质及毒性变化的比较[J]. 环境科学, 2005, **26**(6): 75-78.

[6] 黄满红,李咏梅,顾国维. A₂O 工艺削减城市污水毒性的能力评估[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(1): 32-40.

[7] 赵俊明,李咏梅,周琪. 模拟城市污水在厌氧、缺氧以及好氧反应器中的毒性削减研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2314-2317.

[8] 程晓如,魏娜. SBR 工艺研究进展[J]. 工业水处理, 2005, **25**(5): 10-13.

[9] 张大群,王秀朵. DAT-IAT 污水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[10] 张大群,王秀朵. DAT-IAT 工艺及设备的研究与应用[J]. 给水排水, 2001, **27**(1): 68-71.

[11] 李思敏,许吉现,韩小清. DAT-IAT 工艺处理淘米废水研究[J]. 中国给水排水, 2000, **16**(8): 57-58.

[12] 许吉现,张胜,李思敏,等. DAT-IAT 工艺污水处理一体化设备的应用[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(9): 52-53.

[13] 苏庆永,储金字. 应用 DAT-IAT 工艺污水处理厂的运行效果分析[J]. 环境工程, 2006, **24**(4): 31-33.

[14] 梁伟,李志东,李娜,等. DAT-IAT 工艺处理生活污水的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2006, **29**(2): 104-106.

[15] 石凤,张雁秋,李艳芬,等. 水体富营养化的预防及治理办法[J]. 环境科学与管理, 2008, (2): 144-147.

[16] 马勇,陈伦强,彭永臻,等. 实际生活污水短程/全程硝化反硝化处理中试研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2477-2482.

[17] 陆铁峰. 城市污水生物脱氮除磷常规工艺分析[J]. 云南环境科学, 2002, **21**(1): 47-49.

[18] 徐国辉,鄢卫东. A/DAT-IAT 法的特点及其生物脱氮的应用研究[J]. 安全与环境工程, 2005, **12**(1): 38-41.

[19] 张守彬,于衍真,邱立平. DAT-IAT 改进工艺处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2004, **20**(12): 49-52.

[20] 宋雪英,宋玉芳,孙铁珩,等. 石油污染土壤植物修复后对陆生高等植物的生态毒性[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1866-1871.

[21] 宋雪英,宋玉芳,孙铁珩,等. 柴油污染土壤对小麦种子萌发及幼苗生长的生态毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(3): 554-559.

[22] 张宇,刘国田,张大群. 对改进的 DAT-IAT 污水处理工艺的试验研究[J]. 中国市政工程, 2004, (1): 42-45.

[23] Amuda O S, Amoo I A, Ajayi O O. Performance optimization of coagulant/flocculant in the treatment of wastewater from a beverage industry[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **129**(1-3): 69-72.

[24] Klaunig J E, Kamendulis L M. Mechanisms of acrylamide induced rodent carcinogenesis[J]. Chemistry and Safety of Acrylamide in Food, 2005, **561**: 49-62.

[25] Takigami H, Taniguchi N, Shimizu Y, *et al.* Toxicity assays and their evaluation on organic polymer flocculants used for municipal sludge dewatering[J]. Water Science and Technology, 1998, **38**(7): 207-215.

[26] 李威,周启星,华涛. 常用化学絮凝剂的环境效应与生态毒性研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(6): 943-947.

[27] 刘睿,周启星,张兰英,等. 不同工艺阶段味精废水对作物种子发芽和根伸长的毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(7): 1286-1290.

[28] 张凯松,周启星. 中性环境中铝盐絮凝剂对典型作物的生态毒性效应[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2173-2177.