

城市污水深度处理中有机物的去除

全贵婵, 叶裕才, 云桂春, 金光宇(清华大学核能技术设计研究院, 北京 100084, E-mail: tonggch@263.net)

摘要: 以城市污水地下水回灌为回用目的, 研究不同的污水深度处理工艺及对二级生物处理出水中有机物的去除。研究结果表明, 原水若未经深度处理, 直接由土壤含水层处理的出水不能满足推荐的回灌水质要求。对原水分别采用混凝沉淀、过滤、臭氧氧化、粉末活性炭和粒状活性炭吸附等处理单元及组合工艺进行深度处理效果的对比, 最终选用由混凝沉淀, 砂滤, 粒状活性炭过滤与土壤含水层处理相结合的工艺流程。城市污水处理厂的二级出水经该工艺处理后, 出水中的 DOC 可降至 3mg/L 以下, 且活性炭柱的产水床体积可达 3500BV。

关键词: 城市污水回用; 深度处理; 地下水回灌; 土壤含水层处理; 混凝沉淀; 过滤; 活性炭吸附

中图分类号: X799.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2000)06-04-0073

Removal of Organism from Secondary Effluent in Advanced Wastewater Treatment for Groundwater Recharge

Tong Guichan, Ye Yucai, Yun Guichun, Jin Guangyu (Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: tonggch@263.net)

Abstract: Advanced wastewater treatment processes for groundwater recharge, especially processes to remove organic contaminants from secondary effluent of a sewage treatment plant were studied in this research. When the raw water was recharged directly through surface percolation without advance treatment, effluent of the soil aquifer treatment (SAT) could not meet the recommended reclaimed water quality criteria. Different treatment units and combined processes such as coagulation-sedimentation, filtration, ozonation, powdered activated carbon and granular activated carbon (GAC) adsorption were compared, through which the process of GAC adsorption combined with coagulation-sedimentation and sand filtration before SAT was selected as the optimum process. When the secondary effluent of municipal wastewater treatment plant was treated by this process, DOC of the effluent could decrease to less than 3mg/L and the throughput of the GAC filter could be up to 3500BV.

Keywords: municipal wastewater reuse; advanced treatment; groundwater recharge; soil aquifer treatment (SAT); coagulation and sedimentation; filtration; activated carbon adsorption

污水回用是缓解我国水资源紧张状况的重要途径之一^[1,2]。在城市污水地下水回灌时, 实际有 2 种概念:

①在土壤含水层处理(soil aquifer treatment, SAT)前污水须经深度处理达到饮用水水质, 因此从地下提升出来的水, 可以不受限制地应用。②将 SAT 结合到回用流程中, 污水在 SAT 前只部分净化, 然后再借助土壤含水层中的物理、化学和生物净化作用。再生水则通过取水并抽出, 并根据其水质加以利用。本研究即采用后一种概念。进行地下水回灌时, 需考虑的问题有病原体、无机物总量、重金属和难降解有机物^[3]。欧洲莱茵河用地表水进行土壤渗滤的多年运行经验表明, 致病菌、病毒和寄生虫可用土壤渗滤去除, 其它组分如氮和重金属可在预处理和 SAT 中被去除。因此城市污水

用作地下水回灌时深度处理的主要目标就是去除有机物。

1 水质指标及试验装置

1.1 水质指标

对于将城市污水处理厂的二级出水经深度处理后用于地下水回灌, 目前尚无一个统一的水质标准。参照美国和德国人工地下水回灌的水质标准和工程运行经验^[4,5], 本研究要求经深度处理后回灌水的水质达到表

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-909-01-01-03)

作者简介: 全贵婵(1972~), 女, 博士研究生。

收稿日期: 1999-12-29

* Jekel M, Ernst M. Groundwater recharge of tertiary effluent purified with UF/NF-membranes. '98 Sino-German workshop on wastewater treatment and reuse technology. 北京: 清华大学, 1998: 1~3.

1 的要求. 其中 DOC 指溶解性有机碳, AOX 指可吸附有机卤化物.

表 1 本研究要求的处理出水水质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				
参数	DOC	AOX	$\text{NH}_3\text{-N}$	NO_3
出水要求	3.0	0.03	1	45

1.2 原水水质

本试验所用原水是北京市高碑店污水处理厂的二沉池出水, 试验期间的原水水质见表 2.

表 2 试验期间的原水水质			
水质指标	数值范围	水质指标	数值范围
pH	6.5~7.5	$\text{UV}_{254}/\text{m} \cdot \text{L}^{-1}$	12~17
$\text{COD}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	25~35	$\text{DOC}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5.7~8.5
$\text{BOD}_5/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2.3~4.3	$\text{SS}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	12~24
BOD_5/COD	0.1~0.2	$\text{NH}_3\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.5~30
$\text{AOX}/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	60~75	$\text{NO}_3/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	70~110

采用 $0.2\mu\text{m}$ 的核孔膜过滤原水, 发现原水中溶解性 COD 占原水总 COD 的 75%~83%, 悬浮和胶体状态的 COD 只占总 COD 的 17%~25%.

采用 AOX 分析仪和离子色谱仪联用的方法对水中的 AOX 进行了分离和鉴定, 发现原水中 AOCl 占 AOX 总量的 85%, 浓度约为 $55\sim 60\mu\text{g}/\text{L}$, 基本不含 AOBr , AOI 的含量一般小于 15%. 我国的城市供水采用氯消毒, 所以原水中的 AOX 主要是 AOCl , AOI 主要来源于医院的废水.

分别采用可以截留相对分子质量大于 1000、3000 和 10000 的有机物的 3 种超滤膜 YM1、YM3 和 YM10 过滤原水, 然后测定过滤后水的 DOC、 UV_{254} 和 UV_{436} , 并计算各相对分子质量范围的有机物所占原水的比例, 结果见表 3.

表 3 不同相对分子质量的有机物占原水中总有机物的比例/%				
相对分子质量	< 1000	1000~3000	3000~10000	> 10000
DOC	58.6	15.5	12.1	13.8
UV_{254}	43.9	28.4	17.8	9.9
UV_{436}	9.1	29.1	47.3	14.5

1.3 试验装置

SAT 的工艺流程如图 1 所示. 其中砂滤柱内径 9cm, 滤料为粒径 $1.2\sim 2\text{mm}$ 的普通工程砂, 滤床高度 75cm, 滤速 $8\sim 10\text{m}/\text{h}$, 间歇运行. 土壤渗滤柱的内径 7cm, 滤速 $0.2\text{m}/\text{d}$, 内装粒径为 $0.5\sim 0.9\text{mm}$ 的工程砂, 砂的厚度为 1m. 土壤含水层处理(SAT)包括好氧、

缺氧和厌氧 3 种状态, 试验中分别驯化培养了这 3 种生物状态的土壤柱. 根据土壤柱进出水的氨氮, 硝酸盐氮及溶解氧的变化判断是否处于所要求的生物状态.

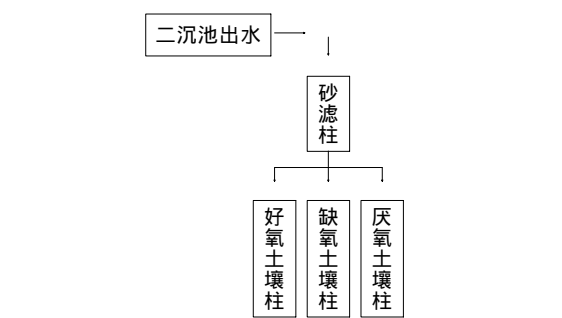


图 1 土壤含水层处理(SAT)的工艺流程

2 试验结果及讨论

2.1 原水直接回灌

原水经砂滤柱过滤后, 直接进 3 种土壤柱后的平均处理效果见图 2. 可以看到, 好氧、缺氧和厌氧土壤含水层处理对 COD、DOC 和 UV_{254} 的去除率基本相当, 其中以好氧柱的去除效果最好. 但是原水直接回灌, 不论是经好氧、缺氧或者厌氧土壤含水层处理, 出水均不能满足回灌水的水质要求. 试验所用原水中的有机物主要是难以生物降解的物质, 可生化性很差, 土壤渗滤效果不佳.

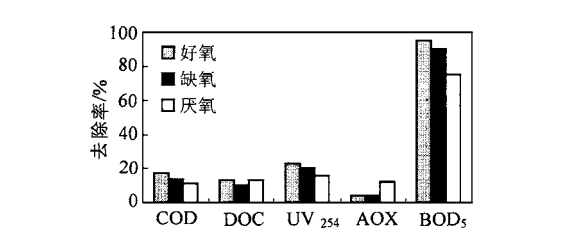


图 2 3 种土壤柱对有机物的去除效果

自然状态下, 厌氧土壤柱对 AOX 的去除率约为 12%, 略高于好氧和缺氧土壤柱. 由于原水中有机物浓度很低, 为研究厌氧柱对 AOX 的去除, 向原水中加入 $80\text{mg}/\text{L}$ 的葡萄糖和 $80\text{mg}/\text{L}$ 的谷氨酸. 此时厌氧土壤柱对 AOX 的降解有明显的改善. 稳定情况下, AOX 的去除率可达 55%, 土壤柱出水的 AOX 可降到 $30\mu\text{g}/\text{L}$ 左右, 满足回灌水质对 AOX 的要求. 厌氧土壤柱去除 AOX 的运行结果见图 3. 经厌氧土壤柱处理后, 出水中的 AOX 全部为 AOCl , 没有检测到 AOI .

2.2 深度处理后回灌

二级出水直接经土壤含水层处理后的出水不能满足推荐的地下水回灌的水质指标, 因此在地下水回灌前, 必须对原水进行深度处理^[2~7]. 由于好氧土壤柱对

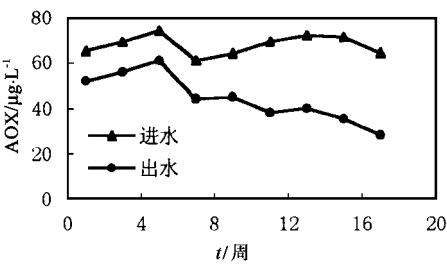


图3 厌氧土壤柱出水的 AOX

有机物的去除效果最佳, 后续的研究以好氧土壤渗滤为主. 本研究共采用了 4 种处理工艺进行对比:

工艺 1: 原水→ 粉末活性炭吸附→ 沉淀→ 好氧土壤渗滤

工艺 2: 原水→ 砂滤→ 臭氧氧化→ 好氧土壤渗滤

工艺 3: 原水→ 砂滤→ 粒状活性炭过滤→ 好氧土壤渗滤

工艺 4: 原水→ 混凝、沉淀→ 砂滤→ 粒状活性炭过滤→ 好氧土壤渗滤

结果表明^[5], 对城市污水处理厂的二级出水采用臭氧氧化和活性炭吸附均可使土壤含水层处理后的出水 DOC 达到 3mg/L. 但若采用工艺 2, 为达到地下水回灌的水质要求, 臭氧的投加量至少要在 24mg/L 以上, 经济上难以承受. 对于粉末活性炭^[6], 由于其对污染负荷的适应性差, 且炭浆分离及再生较复杂, 粉状炭一次使用后多数情况下废弃, 导致处理费用较高. 因此在需要连续投加粉状炭以去除有机污染物的情况下, 用粒状活性炭处理更为有效和经济. 对比工艺 3 和工艺 4, 工艺 4 的出水水质和产水量均优于工艺 3, 因此选定工艺 4 作为城市污水地下水回灌的深度处理工艺流程.

(1) 混凝沉淀 混凝沉淀实验用烧杯进行. 混凝快速搅拌速度 150r/m in, 搅拌时间 1m in; 慢速搅拌速度为 30r/m in, 搅拌时间 20m in, 然后静置沉淀 20m in. 通过对不同生产厂家的硫酸铝、氯化铁和聚合氯化铝 (PAC) 的比较, 选用浙江东昌生产的 PAC(Al_2O_3 含量为 28.0%, 碱度 50.0). 对实验用原水, 其适宜的投加量为 20~30mg/L. PAC 投加量为 20mg/L 时, 对 COD、DOC、 UV_{254} 和 UV_{436} 的去除率分别是 23%, 18%, 25% 和 67%. PAC 投加量超过 30mg/L 后, 对 COD、DOC、 UV_{254} 和 UV_{436} 的去除率基本保持不变.

从对原水中有机的分析可知, 原水中呈悬浮和胶体状态的 COD 占原水总 COD 的 17%~25%. 由于混凝沉淀对于原水中呈悬浮和胶体状态的 COD 去除率较高, 所以投加 20mg/L 的 PAC 去除约 23% 的

COD. 由于原水中大部分 COD 为溶解性的, 所以加大 PAC 的投量不能明显提高对 COD 的去除率. 由表 3 可知, 原水中 UV_{436} 所表征的有机物中 61.8% 来源于相对分子质量大于 3000 的有机物, 而混凝沉淀对相对分子质量大于 3000 的有机物去除效果较好, 因此 UV_{436} 降低较多, 达 67% 左右. 原水中 UV_{254} 所表示的芳香族有机物中相对分子质量大于 3000 的只占 28.7%, 混凝沉淀对小分子有机物的去除效果较差, 所以 UV_{254} 的去除率远低于 UV_{436} , 只有 25%. 相对分子质量大于 3000 的有机物只占原水总 DOC 的 25.9%, 因此混凝沉淀对 DOC 的去除率有限, 只有 18%.

(2) 过滤 直接过滤对 COD 的平均去除率为 20%~25%, 原水经直接过滤后出水的 SS 浓度低于 3mg/L, 说明直接过滤不仅可以去除几乎全部悬浮性的 COD, 还可同时去除部分溶解状态的 COD.

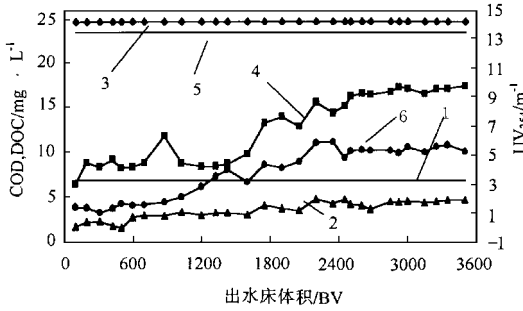
(3) 粒状活性炭吸附 通过静态吸附实验选出了去除有机物效果最佳的 GH-16 型杏核无定形炭. 静态吸附实验结果用从德国引进的 ADSA 软件进行分析, ADSA 软件是通过求解 Crittenden 方程来估算污水中所含有机物被吸附到活性炭上的可能性, 这些有机物以 DOC 表征的方式按可吸附性被分为几类. 表 4 给出了 GH-16 型活性炭对水中有机的吸附行为.

表 4 GH-16 型活性炭对废水中有机的吸附效果					
有机物吸附效果	极好	较好	一般	差	不能被吸附
有机物含量/%	34.3	3.1	26.1		36.4

(4) 深度处理组合工艺的出水 在土壤含水层处理前, 二沉池出水由混凝沉淀、过滤与粒状活性炭吸附工艺进行处理. 工艺中混凝剂 PAC 的投加量为 20mg/L. 砂滤柱直径为 2.9cm, 柱内填充粒径为 0.5~0.9mm 的普通工程砂, 填充高度 60cm. 活性炭柱内径 2cm, 活性炭填充高度 40cm, 滤速 5m/h.

该深度处理组合工艺的出水水质如图 4 所示. 运行期间该工艺对原水 DOC、COD 和 UV_{254} 的去除率分别为 30.5%~77%, 30%~74%, 56%~92%.

根据粉状活性炭、臭氧与好氧土壤渗滤的运行结果^[5], 好氧土壤柱的进水 DOC 大约 4.5mg/L 左右时, 其出水 DOC 可小于 3mg/L, 故活性炭柱的运行终点定为 4.5mg/L. 从图 4 可以看出, 该工艺出水的 DOC 值在活性炭柱产水床体积为 1025BV 前可保持在 3mg/L 以下, 在 2200BV 时达到 4.5mg/L. 另外, 在整个运行期间工艺出水的平均 DOC 值为 3.53mg/L, 在产水床体积为 2200~3500BV 时出水 DOC 的平均值为 4.41mg/L, 故该工艺活性炭柱的合格产水床体积可认



1. 原水 DOC 2. 出水 DOC 3. 原水 COD
4. 出水 COD 5. 原水 UV₂₅₄ 6. 出水 UV₂₅₄

图 4 工艺 4 GH-16 活性炭柱的穿透曲线

为是 3500BV。运行结果还表明,在粒状活性炭吸附前进行混凝沉淀和砂滤,不仅可以提高对二级生物处理出水中有机物的去除效果,而且延长了活性炭柱的运行时间。

2.3 讨论

(1) 由于原水在污水处理厂已经过二级生物处理,出水中主要是难生物降解的有机物($BOD_5/COD=0.1\sim0.2$);AOX 浓度极低,加上水中其它相对高浓有机物的竞争作用,土壤含水层处理对其去除效果不明显。只有在厌氧条件下,利用葡萄糖和谷氨酸作为厌氧细菌的能量来源,在共代谢的基础上才能分解 AOX。

(2) 好氧、缺氧和厌氧状态的土壤柱对氨氮和硝酸盐氮的去除率差别较大,好氧态对氨氮的去除率大于 90%,氨氮被转化为硝酸盐氮,出水 NH_3-N 浓度降到 0.5mg/L 以下,而 NO_3^- 的浓度上升到 120mg/L 以上,总氮浓度基本没有变化。缺氧状态下土壤含水层处理对 NH_3-N 基本没有去除效果,但是对 NO_3^- 的去除率可达 33%,出水中 NO_3^- 浓度降为 20~28mg/L,总氮浓度因此而降低。在厌氧状态下, NO_3^- 的去除率最高可达 69%,出水 NO_3^- 浓度降至 10~12mg/L,但是 NH_3-N 浓度升高,总氮浓度基本不变。因此,单独的好氧或厌氧态土壤含水层处理,很难使 NH_3-N 和 NO_3^- 同时满足要求。实际的地下含水层中土壤从表层到含水层底部分别是好氧、缺氧和厌氧 3 种状态,因此当进水氨氮和硝酸盐氮小于一定浓度时,可以使土壤含水

层处理后出水中的氨氮和硝酸根离子同时满足回灌水的水质要求。这就要求污水处理厂应当完成脱氮的任务或者在人工地下水回灌前的深度处理工艺流程中增加脱氮工艺。

3 结论

(1) 北京高碑店污水处理厂的二级出水如果直接由地表渗滤进行人工地下水回灌,经土壤含水层处理后的出水不能满足推荐的回灌水水质要求,因此二级出水必须经深度处理后才能回灌。

(2) 好氧、缺氧和厌氧状态的土壤柱对 COD、DOC、UV₂₅₄ 和 AOX 的去除率基本相当,但当原水中加入易生物降解的葡萄糖和谷氨酸时,厌氧土壤柱对 AOX 的去除效果可明显改善,满足回灌水的要求。

(3) 选用混凝沉淀、砂滤、粒状活性炭过滤与土壤含水层处理组合工艺作为城市污水处理厂的二级出水进行地下水回灌的深度处理工艺,二级出水中的有机污染物可被有效去除,整个工艺流程的出水 DOC 可小于 3mg/L,满足回灌水对 DOC 的要求,而且活性炭柱的产水床体积可达 3500BV。

参考文献:

- 1 Joerg E Drewes, Martin Jekel. Behavior of DOC and AOX using advanced treated wastewater for groundwater recharge. Water Research, 1998, 32(10): 3125~ 3133.
- 2 周彤,张杰等主编. 城市污水回用设计规范. 上海: 中国工程建设标准化协会城市给排水委员会,1995,1~ 37.
- 3 Zhang Zhongxiang, Qian Yi. Water saving and wastewater reuse and recycle in China. Water Science and Technology, 1991, 23: 2135~ 2140.
- 4 James Crook. Quality criteria for reclaimed water. Water Science and Technology, 1991, 24(9): 109~ 121.
- 5 全贵婵,蹇兴超等. 城市污水地下回灌深度处理技术. 中国环境科学, 1999, 19(3): 219~ 222.
- 6 兰淑澄. 活性炭水处理技术. 北京: 中国环境科学出版社, 1991. 7~ 38, 74~ 108.
- 7 Tobiason J E, Edzwald J K, Rechhow D A et al. Effect of pre-ozonation on organics removal by in-line direct filtration. Water Science and Technology, 1993, 27(11): 81~ 90.