

人工地下水回灌过程中溶解性有机物的去除及变化

赵庆良, 薛爽, 王丽娜

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:在实验室通过模拟土壤柱研究了人工地下水回灌过程中溶解性有机物的去除及其三卤甲烷生成势和三卤甲烷生成活性的变化.利用 XAD 树脂将回灌水中的溶解性有机物分为 3 个部分:疏水性有机酸、过渡亲水性有机酸和亲水性有机物.疏水性有机酸的三卤甲烷生成活性高于过渡亲水性有机酸和亲水性有机物.土壤含水层处理(SAT)对亲水性有机物的去除率为 68.51%,对疏水性有机酸和过渡亲水性有机酸的去除率分别为 58.64%和 41.86%.经 SAT 系统处理后,溶解性有机物及各有机组分的三卤甲烷生成势减少,而三卤甲烷生成活性升高.疏水性有机酸是生成三卤甲烷的主要有机组分.亲水性有机物在 SAT 系统进水中的三卤甲烷生成活性较低,但由于含量高,三卤甲烷生成势也较大.而过渡亲水性有机酸由于含量和三卤甲烷生成活性较低,三卤甲烷生成势也较低.

关键词:土壤含水层处理;地下水回灌;溶解性有机物;分级;三卤甲烷生成势;三卤甲烷生成活性

中图分类号:X523 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2007)08-1726-06

Removal and Transformation of Dissolved Organic Matter During Groundwater Recharge Using Reclaimed Wastewater

ZHAO Qing-liang, XUE Shuang, WANG Li-na

(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the removal and transformation of dissolved organic matter (DOM) through laboratory-scale soil aquifer treatment (SAT) soil columns. Using XAD resins, DOM was fractionated into 3 fractions: hydrophobic acid (HPO-A), transphilic acid (TPI-A) and hydrophilic fraction (HPI). Laboratory-scale SAT columns reduced about 58.64%, 41.86% and 68.51% of HPO-A, TPI-A and HPI, respectively. All samples studied exhibited a common general relationship with respect trihalomethane formation potential (THMFP): HPO-A > HPI > TPI-A. Specific ultraviolet light absorbance (SUVA) and specific trihalomethane formation potential (STHMFP) values for various DOM fractions increased across the SAT columns. HPI exhibited greater increase in SUVA and STHMFP than HPO-A and TPI-A. The STHMFP of HPO-A was greater than that of corresponding TPI-A and HPI fractions in all samples.

Key words: soil aquifer treatment; groundwater recharge; dissolved organic matter (DOM); fractionation; trihalomethane formation potential; specific trihalomethane formation potential

人工地下水回灌是扩大污水回用最有益的方式之一.在回灌过程中,溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)在非饱和带与有机污染物及重金属的相互作用异常活跃,并且还是在再生水加氯消毒过程中形成消毒副产物的主要前体物质.因此, DOM 已成为近十几年来人工地下水回灌研究的热点和重点^[1].目前对 DOM 的研究主要集中在土壤含水层处理(soil aquifer treatment, SAT)对其的去除作用和去除机理上,而对 DOM 在 SAT 中卤代活性的变化,尤其是不同有机组分与消毒剂反应生成消毒副产物的研究还鲜见报道.近年来发展的树脂吸附分级法为研究 DOM 不同组分的特性提供了一种有效手段^[2].本试验利用非离子吸附树脂将 DOM 分级,以三卤甲烷为代表性消毒副产物,研究回灌过程中不同有机组分的三卤甲烷生成势(trihalomethane formation potential, THMFP)及三卤甲烷生成活性(specific trihalomethane formation potential, STHMFP)的变化,以

期为控制消毒副产物的形成提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验水质分析

哈尔滨市某污水处理厂二级生化出水经活性炭吸附,滤纸过滤后作为试验用水,试验运行期间,试验装置的进水水质见表 1.

1.2 试验装置

试验装置由 3 段模拟 SAT 的土壤柱串联而成.每段土壤柱的长度为 0.55 m,直径 0.1 m,每段之间设有取样口.试验装置如图 1 所示.土壤柱装土采自松花江干涸的河床,其干容重为 1.45 g/cm³,孔隙度为 0.30,土壤 pH 值为 8.20,有机质含量为 4.1%,土

收稿日期:2006-09-11;修订日期:2006-12-25

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418505)

作者简介:赵庆良(1962~),男,教授,博士生导师,主要研究方向为污水废水处理及资源化、垃圾渗沥液处理及污泥减量技术, E-mail: qlzhao@hit.edu.cn

表 1 试验期间的进水水质 (n = 20)

Table 1 Water quality data for influent between March 2005 and June 2006 (n = 20)

参数	数值	参数	数值
pH	7.6 ± 0.1	UV ₂₅₄ /m ⁻¹	13.7 ± 0.7
COD/mg•L ⁻¹	35 ± 2.7	硝酸盐(以 N 计)/mg•L ⁻¹	3.2 ± 1.7
TOC/mg•L ⁻¹	16.68 ± 1.3	氨氮(以 N 计)/mg•L ⁻¹	2.0 ± 1.5
DOC/mg•L ⁻¹	12.08 ± 0.9	总磷/mg•L ⁻¹	3.1 ± 0.2

表 2 土壤颗粒级配

Table 2 Mechanical composition of soil for soil columns

颗粒分类	含量/%
砂粒(1 ~ 0.05 mm)	49
粉粒(0.05 ~ 0.01 mm)	21
粉粒(0.01 ~ 0.001 mm)	23
粘粒(< 0.001 mm)	7

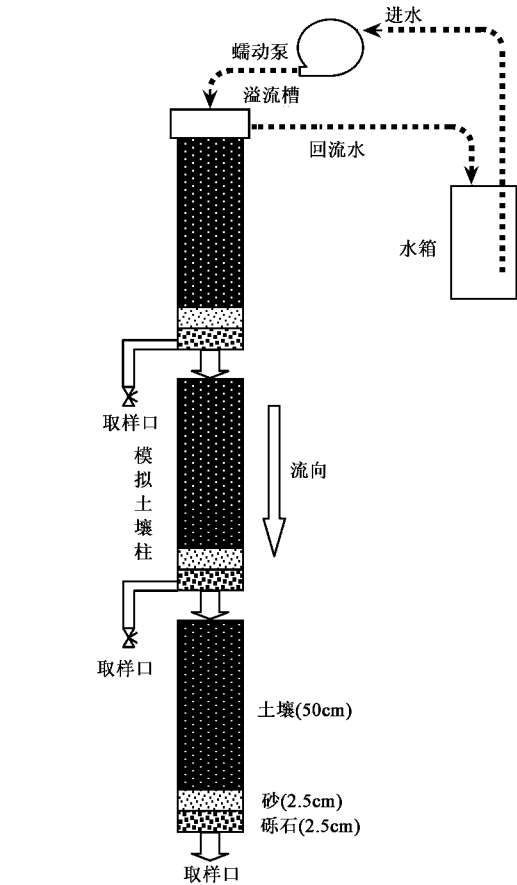


图 1 SAT 系统装置

Fig. 1 Scheme of the laboratory-scale soil aquifer treatment system

壤颗粒级配如表 2 所示. 根据卡庆斯基质地分类标准, 土壤质地为轻壤土. 二级生化出水经活性炭吸附, 滤纸过滤后由泵抽升进入该 SAT 系统. 通过溢流槽的作用, 该系统保持 2 cm 的水头运行, 滤速平均为 0.5 mL/min. 系统采用干湿期交替运行的方式(干期、湿期均为 10 d). 试验前, 系统运行约半年进行生物驯化.

1.3 DOM 的分级方法

DOM 实际上是人为或操作性限定的, 认为能通过孔径为 0.2 μm 或 0.45 μm 滤膜的有机物就为 DOM, 大多以 0.45 μm 划分. 本研究采用 0.45 μm 作

为划分 DOM 的标准.

有机物分级法分为 2 类: 制备级分级法 (preparative fractionation method) 和分析级分级法 (analytic fractionation method). 分析级分级法简单方便, 不需要大量的树脂和水样, 涉及的测定步骤少, 引入的系统误差小, 较制备级分级结果更为准确. 所以本研究采用分析级分级法, 根据 Malcolm 和 Aiken 等提出的按照有机物在 XAD-8 和 XAD-4 树脂上的吸附特性, 将 DOM 分为 3 个部分: 疏水性有机酸、过渡亲水性有机酸和亲水性有机物^[3,4].

XAD-8 和 XAD-4 树脂柱的体积均为 6 mL. 进行 DOM 分级试验前, 将 XAD-8 和 XAD-4 树脂柱串联连接, 用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液和 0.1 mol/L 的 HCl 溶液交替清洗至少 3 次. 然后用约 1 L 的高纯度水冲洗. 过最后部分纯水时, 取 25 mL 测 TOC, 作为柱空白 (B1), B1 与 B2 (纯水的 TOC) 的差别应在 TOC 仪测量误差范围内 (即应保证 B1 = B2).

图 2 表示的是 DOM 的分级步骤. DOM 的分级须进行平行试验, 取其平均值. 具体试验步骤如下: ①取经过 0.45 μm 的硝酸纤维素滤膜过滤后的水样 500 mL, 用 6 mol/L 的 HCl 溶液酸化至 pH = 2 后通过 XAD-8 树脂柱. 然后用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液反冲柱, 反冲出的有机物称为疏水性有机酸 (hydrophobic acid, HPO-A). ②将从 XAD-8 树脂柱流出的水样通过 XAD-4 树脂柱. 然后用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液反冲柱, 反冲出的有机物称为过渡亲水性有机酸 (transphilic acid, TPI-A). 从 XAD-4 树脂柱流出的部分称为亲水性有机物 (hydrophilic fraction, HPI). ③测定 DOM1 ~ DOM4 的 DOC 和 UV₂₅₄. 进行三卤甲烷生成势试验时, 将所分离的组分用 NaOH 溶液或 HCl 溶液调节 pH 值约为 7.

各有机组分按下式计算:

疏水性有机酸 = DOM2 × (反冲液体积/水样体积)
过渡亲水性有机酸 = DOM3 × (反冲液体积/水样体积)
亲水性有机物 = DOM4

1.4 试验仪器与方法

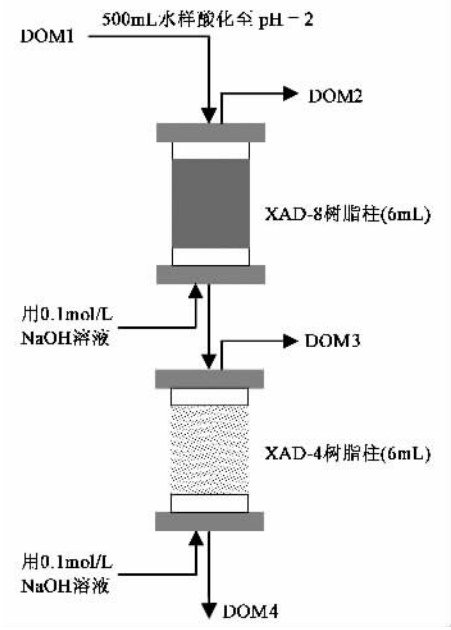


图 2 DOM 分级流程

Fig.2 Schematic diagram of the procedure for DOM fractionation

所有水样均经过 0.45 μm 的硝酸纤维素滤膜过滤,检测前在 4℃ 条件下保存.

DOC 和 UV_{254} 分别采用 Shimadzu TOC-5000 型总有机碳分析仪和 Shimadzu UV-2550 型紫外可见分光光度计测定. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用 CM-03N 型便携式氨氮测定仪测定. 气相色谱仪为 Agilent4890 型,色谱检测器为电子捕获检测器(ECD).

三卤甲烷生成势是指在保证加氯量足够的条件下,与氯反应足够长的时间后,水样中所能产生的三卤甲烷的最大量. 具体测定步骤为:取 100 mL 水样,放入磨口玻璃瓶中,同时加入磷酸盐缓冲溶液调节水样 pH 值为 7 ± 0.1 . 向水样中加入 NaClO 溶液,投加量按公式 $[\text{Cl}_2] = (3 \times [\text{DOC}]) + (7.5 \times [\text{NH}_4^+])$ 计算^[5]. 加盖后将水样放入 $(20.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的生化培养箱中,在避光条件下,放置 120 h. 120 h 后用硫代硫酸钠终止反应. 取 25 mL 已终止反应的水样,加入 2 mL 甲基叔丁基醚(MTBE)和 10 g Na_2SO_4 ,剧烈振荡直至 Na_2SO_4 全部溶解,静止分层,待两相分层后用微量进样器抽取 1 μL 有机相注入气相色谱仪. 色谱条件:ECD 检测器温度 310°C ,进样口温度 240°C ,色谱柱为石英毛细管柱,载气为高纯氮气.

2 结果与讨论

2.1 SAT 对 DOC 的去除作用

该土壤柱系统模拟了回灌水在非饱和带中最初

1.5 m 的渗滤过程. 从图 3 中可以看出,在 130 d 的运行时间内, SAT 系统中进水、0.5 m 出水、1.0 m 出水和 1.5 m 出水中 DOC 的平均浓度分别为 12.08、6.40、4.72 和 4.00 mg/L. 整个土壤柱系统对 DOC 的去除率为 67.03%,第 1 段土壤柱对 DOC 的去除率为 47.12%. 这说明 SAT 系统对 DOC 的去除作用主要是在最初的土壤渗滤过程中完成的,DOC 的最高去除率发生在距地面 0.5 m 的土层中. Tanja 等认为 SAT 对 DOC 的去除机理主要是生物降解^[6].

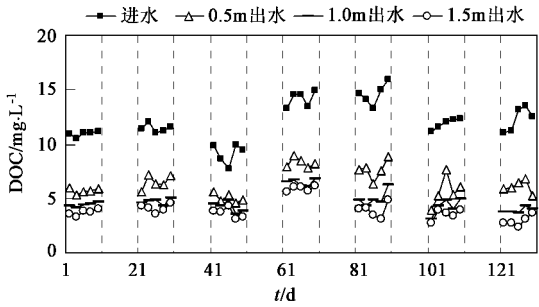


图 3 土壤柱系统进水、0.5 m 出水、1.0 m 出水和 1.5 m 出水中 DOC 的浓度

Fig.3 DOC concentration of influent, and 0.5 m-, 1.0 m- and 1.5 m-effluent for soil columns

2.2 各有机组分在 SAT 系统中的去除

图 4 是 SAT 系统进水和出水中各有机组分的分布情况. 进水中 DOM 的含量为 8.33 mg/L(以 DOC 计),其中疏水性有机酸占 31.93%,过渡亲水性有机酸占 15.39%,亲水性有机物占 49.94%. SAT 系统出水中,疏水性有机酸和过渡亲水性有机酸分别上升为 32.07%和 21.87%,亲水性有机物占 38.19%. 可见,在该 SAT 系统中,亲水性有机物是主要的有机组分,疏水性有机酸次之,而过渡亲水性有机酸的含量最低. 由图 4 可以看出, SAT 系统对疏水性有机酸、过渡亲水性有机酸和亲水性有机物的去除率分别为 58.64%、41.86%和 68.51%.

Quanrud 等发现大部分的疏水性有机酸和亲水性有机物是在最初的土壤渗滤过程中被生物降解的^[7]. Fox 和 Rauch 等指出在 SAT 系统中,亲水性有机物主要是靠生物降解去除的,疏水性有机酸的去除则依赖生物降解和吸附等非生物作用^[8,9]. 亲水性有机物中包括一些易生物降解的低分子量有机物,如氨基酸、蛋白质和多聚糖等,这类物质在 SAT 系统中被优先去除^[10],因此 SAT 系统对亲水性有机物的去除率最高. Jorg 等认为由于较大的分子量和较强的疏水性,疏水性有机酸比过渡亲水性有机酸具

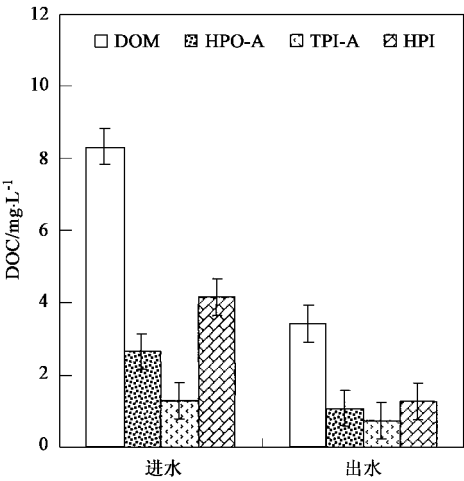


图 4 进水和出水中 DOM 的分布

Fig.4 Fractionation of DOM for the laboratory-scale SAT influent and effluent

有更强的吸附性^[1],因此 SAT 对疏水性有机酸的去除率高于其对过渡亲水性有机酸的去除率.

2.3 各有机组分的 SUVA、三卤甲烷生成势和三卤甲烷生成活性在 SAT 中的变化

图 5 是 SAT 系统进水和出水中 DOM 及各有机组分的 SUVA 值.SUVA 是 UV_{254} 与 DOC 的比值,其大小可以反映出有机物的某些特性,如不饱和双键或芳香环有机物相对含量的多少等^[11].疏水性有机酸的 SUVA 值较高,而过渡亲水性有机酸和亲水性有机物的 SUVA 值较低(图 5),这说明不饱和双键或芳香环有机物的疏水性有机酸中的含量较高,而在过渡亲水性有机酸和亲水性有机物中的含量较低.从图 5 可知,经 SAT 处理后,DOM 和各有机组分的 SUVA 均升高,其中亲水性有机物升高的幅度最大.这是由 SUVA 这一参数的特性决定的^[12],SUVA 是 UV_{254} 与 DOC 的比值.SAT 优先去除非腐殖类有机物(紫外吸收值较低),导致 DOC 显著下降,而 UV_{254} 的降低则不明显.因此,SUVA 升高^[1].另外,亲水性有机物中脂肪碳的含量最多.在 SAT 中,脂肪族化合物比芳香族化合物更容易被去除,而脂肪族化合物对紫外吸收的贡献较小,因而亲水性有机物的 SUVA 值升高的幅度最大.

图 6 和图 7 分别表示 DOM 及各有机组分在 SAT 系统处理前后三卤甲烷生成势和三卤甲烷生成活性的变化.三卤甲烷生成势间接代表了水中三卤甲烷前体物的多少.单位质量有机物的三卤甲烷生成势称为该有机物的三卤甲烷生成活性,代表了该有机物与氯反应生成三卤甲烷的能力^[13].

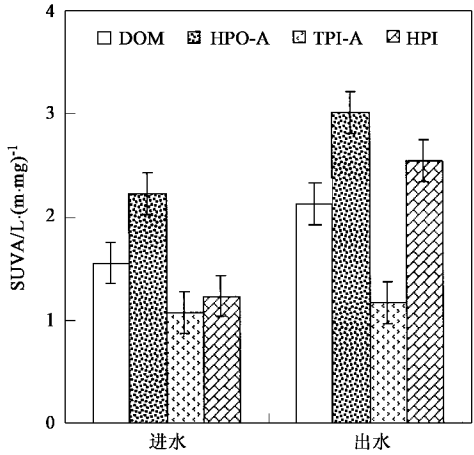


图 5 进水和出水中 DOM 及各有机组分的 SUVA 值

Fig.5 SUVA values for DOM, HPO-A, TPI-A and HPI in the laboratory-scale SAT influent and effluent

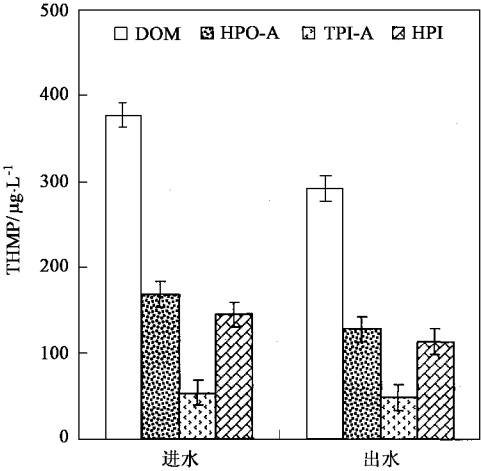


图 6 进水和出水中 DOM 及各有机组分的三卤甲烷生成势

Fig.6 THMFP from DOM, HPO-A, TPI-A and HPI in the laboratory-scale SAT influent and effluent

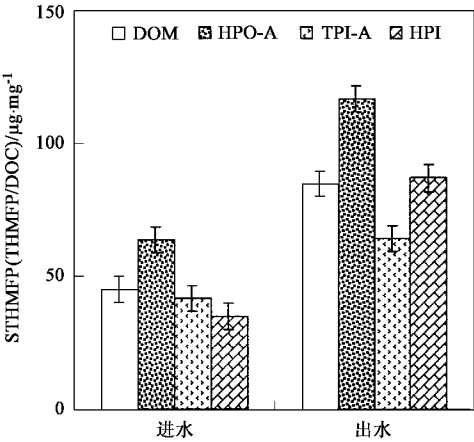


图 7 进水和出水中 DOM 及各有机组分的三卤甲烷生成活性

Fig.7 STHMFP values for DOM, HPO-A, TPI-A and HPI in the laboratory-scale SAT influent and effluent

从图 6 和图 7 可以看出,经 SAT 系统处理后,DOM 及各有机组分的三卤甲烷生成势降低,而三卤甲烷生成活性升高,DOM 的三卤甲烷生成势降低了 22.56%,但三卤甲烷生成活性由 45.15 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 上升到 84.91 $\mu\text{g}/\text{mg}$,这说明 SAT 系统优先去除三卤甲烷生成活性较低的有机物.虽然 SAT 降低了回灌水的三卤甲烷生成势,但 SAT 系统出水中 DOM 与氯反应生成三卤甲烷的能力却增强了.

在 SAT 系统的进、出水中,疏水性有机酸的三卤甲烷生成势最高,其次是亲水性有机物,过渡亲水性有机酸的三卤甲烷生成势最低.在这 3 种有机组分中,疏水性有机酸的三卤甲烷生成活性最高,三卤甲烷生成势也最高,可见,疏水性有机酸是主要的三卤甲烷前体物质.在 SAT 系统出水中,亲水性有机物也具有较高的三卤甲烷生成活性,但在进水中亲水性有机物的三卤甲烷生成活性最低,但由于含量较高(49.94%),三卤甲烷生成势也较高.而过渡亲水性有机酸由于含量和三卤甲烷生成活性均较低,三卤甲烷生成势也较低.

从图 7 可以看出,疏水性有机酸的三卤甲烷生成活性高于过渡亲水性有机酸和亲水性有机物.这一试验结果和前人的看法一致:疏水性有机酸是三卤甲烷的主要前体物质.Singer 指出在自然水体中,疏水性有机酸与氯反应生成三卤甲烷的能力比其他有机组分强^[14].Zou 等认为有机分子与自由氯的反应发生在活化芳环(包含羟基的芳环)上^[15].活化芳环的存在之所以能够导致有机分子与氯反应生成三卤甲烷是由于羟基的作用^[16].Quanrud 等认为疏水性有机酸中芳环含量较高,因此该有机组分与氯反应生成三卤甲烷的能力也较强^[17].

3 结论

(1) SAT 系统对 DOC 的平均去除率为 67.03%.DOC 主要是在距地面 1.5 m 的土层中被去除的,最高去除率发生在距地面 0.5 m 的土层中.

(2) 利用 XAD 树脂分级的结果表明,在 SAT 系统中,亲水性有机物是主要的有机组分,疏水性有机酸次之,而过渡亲水性有机酸的含量最低.SAT 系统优先去除亲水性有机物,去除率为 68.51%,对疏水性有机酸和过渡亲水性有机酸的去除率分别为 58.64%和 41.86%.疏水性有机酸的 SUVA 最高,而过渡亲水性有机酸和亲水性有机物的 SUVA 较低.经 SAT 系统处理后,DOM 及各有机组分的 SUVA 升高.亲水性有机物的 SUVA 升高的幅度最大.

(3) 经 SAT 系统处理后,DOM 及各有机组分的三卤甲烷生成势降低,而三卤甲烷生成活性升高.疏水性有机酸的三卤甲烷生成活性高于过渡亲水性有机酸和亲水性有机物.疏水性有机酸的三卤甲烷生成活性最高,三卤甲烷生成势最高,是再生水加氯消毒时产生三卤甲烷的主要前体物质.SAT 系统进水中的亲水性有机物的三卤甲烷生成活性较低,但由于含量较高,三卤甲烷生成势也较高.而过渡亲水性有机酸由于含量较低,三卤甲烷生成活性较低,三卤甲烷生成势也较低.

参考文献:

- [1] Jorg E, Drewes, Peter F. Fate of nature organic matter (NOM) during groundwater recharge using reclaimed water [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **40**(9): 241 ~ 249.
- [2] Leenheer J A, Croue J P. Characterizing dissolved aquatic organic matter [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, **37**(1): 19 ~ 26.
- [3] Malcolm R L. Factors to be considered in the isolation and characterization of aquatic humic substances [A]. In: Allard B, Boren H, Grimvall A. *Humic Substances in the Aquatic and Terrestrial Environment, Proceedings of an International Symposium* [C]. Linköping, 1991. 9 ~ 36.
- [4] Aiken G L, McKnight D M, Thorn K A, *et al.* Isolation of hydrophilic organic acids from water using nonionic macroporous resins [J]. *Org Geochem*, 1992, **18**(4): 567 ~ 573.
- [5] Bokson K, Sangyoun L, Jaewon C, *et al.* Biodegradability, DBP formation, and membrane fouling potential of nature organic matter: characterization and controllability [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**(3): 732 ~ 739.
- [6] Tanja R W, Drewes J E. Using soil biomass as an indicator for the biological removal of effluent-derived organic carbon during soil infiltration [J]. *Wat Res*, 2006, **40**(5): 961 ~ 968.
- [7] Quanrud D M, Hafer J, Karpiscak M M, *et al.* Fate of organics during soil-aquifer treatment: sustainability of removals in the field [J]. *Wat Res*, 2003, **37**(14): 3401 ~ 3411.
- [8] Fox P, Aboshanp W, Alsamadi B. Analysis of soils to demonstrate sustained organic carbon removal during soil aquifer treatment [J]. *J Environ Qual*, 2005, **34**(1): 156 ~ 163.
- [9] Rauch T, Drewes J E. Quantifying organic carbon removal in groundwater recharge systems [J]. *Environ Eng*, 2005, **131**(6): 909 ~ 923.
- [10] Namour P, Muller M C. Fractionation of organic matter from wastewater treatment plants before and after a 21-day biodegradability test: a physical-chemical method for measurement of the refractory part of effluents [J]. *Wat Res*, 1998, **32**(7): 2224 ~ 2231.
- [11] Edzwald J K, Tobiason J E. Enhanced coagulation: US requirements and a broader view [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **40**(9): 63 ~ 70.
- [12] Basu O D, Huck P M. Removal of humic acid by biofiltration [J]. *Wat Sci Tech*, 2004, **4**(4): 147 ~ 154.
- [13] Westerhoff P, Pinney M. Dissolved organic carbon transformations during laboratory-scale groundwater recharge using lagoon-treated wastewater [J]. *Waste Mangement*, 2000, **20**(1): 75 ~ 83.

[14]

Singer P C. Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products [J]. Wat Sci Tech, 1999, 40(9): 25 ~ 30.

[15]

Zou H, Yang S, Xu X, *et al.* Formation of POX and NPOX with chlorination of fulvic acid in water: empirical models [J]. Wat Res, 1997, 31(6): 1536 ~ 1541.

[16]

Galapate R P, Baes A U, Ito K, *et al.* Trihalomethane formation potential prediction using some chemical functional groups and bulk parameters [J]. Wat Res, 1999, 33(11): 2555 ~ 2560.

[17]

Quanrud D M, Karpiscak M M, Lansey K E. Transformation of effluent organic matter during subsurface wetland treatment in the Sonoran Desert [J]. Chemosphere, 2004, 54(6): 777 ~ 788.

欢迎订阅 2007 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想,理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国工程索引 EI;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

《环境科学》2007 年为 16 开本,40 元/册,全年 12 期.

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 0205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail: hjkx@rcees.ac.cn;网址: www.hjkx.ac.cn