

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究

高涓湍, 张薛, 赵璇*, 赵刚

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 将再生水回灌到地下含水层前, 需对再生水进行预处理, 以防止污染地下水. 本研究比较了5种不同的再生水深度处理技术(超滤、臭氧、磁性离子交换树脂(MIEX)及超滤和臭氧、MIEX和臭氧两套组合工艺)对城镇二级出水的净化效果, 并通过分析5种工艺对含水层净化效果的影响, 评价其作为回灌预处理的可行性. 针对再生水中的有机污染物溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)及比吸光度(specific ultraviolet absorbance, SUVA), MIEX(投加量为 $5\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$)能够去除20%的DOC和10%的SUVA; UF对DOC的去除率低于10%, 对SUVA无显著去除效果, 单独UF和MIEX预处理对后续含水层对再生水DOC的去除无促进作用; 与此不同, 臭氧[投加量(O_3/DOC)为 $0.6\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$]及其组合工艺对二级出水SUVA的去除率达60%~79%, 能显著提高再生水的可生化性, 强化土壤对回灌水中有机物的去除效果, 使最终出水的DOC降低至 $1\sim2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 针对再生水中的N素, MIEX($5\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$)能去除再生水中25%的 NO_3^- -N, 臭氧能去除再生水中72%的 NH_4^+ -N. 土壤处理能有效地去除 NH_4^+ -N, 使出水浓度均在 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 但对 NO_3^- -N无显著去除效果. 综合对比分析, 在再生水回灌的预处理工艺中, 需重点考察预处理对再生水中有有机物和 NO_3^- -N的去除效果. 臭氧和MIEX的组合工艺, 能显著提高二级出水的可生化性, 并去除部分溶解性有机物及 NO_3^- -N, 与后续土壤处理具有较好的互补性, 较适合用作地下回灌前处理工艺.

关键词: 地下回灌; 深度处理; 臭氧氧化; 磁性离子交换树脂; 超滤

中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)03-0777-05

Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge

GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, ZHAO Gang

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To prevent groundwater contamination, pretreatments of reclaimed water are needed before the groundwater recharge. In this study, five treatments, including ultrafiltration (UF), ozonation, magnetic ion exchange (MIEX), UF coupled with ozonation and MIEX coupled with ozonation, were evaluated for their purification efficiencies of the reclaimed water and their influences on the following soil aquifer treatments. For organic matters in the secondary effluents, identified as dissolved organic carbon (DOC) and specific ultraviolet absorbance (SUVA), 20% DOC and 10% SUVA are removed by MIEX treatment with dose of $5\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, while only 10% DOC and no SUVA are removed by UF, but neither of these two pretreatments enhance the purification of soil aquifer treatments. Differently, SUVA of the secondary effluents are removed by 60%-79% by ozonation alone or coupled with UF/MIEX, increasing the biodegradability of the reclaimed water. These pretreatments significantly enhance the removal of organic matters by the following soil aquifer with DOC in the final effluents reducing to $1\sim2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. For nitrogen, MIEX can remove 25% NO_3^- -N, and ozonation can remove 72% NH_4^+ -N. The soil aquifer treatment could efficiently remove NH_4^+ -N to below $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, while no obvious removal is detected for NO_3^- -N. In conclusion, more attentions should be paid to the organic matters and NO_3^- -N during the pretreatments of reclaimed water. Among all the pretreatments tested here, ozonation coupled with MIEX is capable of increasing the biodegradability of the reclaimed water and removing NO_3^- -N, which is a good choice for the pretreatment of groundwater recharge.

Key words: underground re-irrigation; deep treatment; ozonation; MIEX; ultrafiltration

我国北方许多城市普遍存在水资源短缺、地下水过度开采、地下水水位下降等问题, 成为制约经济发展的主要因素^[1], 城市再生水回用是缓解水资源短缺的一个重要途径. 利用再生水补充地下水, 具有扩大地下水资源的存储量, 减缓地面沉降, 防止海水入侵等优势, 是一种非常有潜力的再生水回用方式^[2].

再生水涵养补给地下水的过程中, 保证再生水水质安全、防止污染地下水是回用的关键. 因此, 再生水回灌地下前, 需要进行深度处理, 保证水质安

全. 本研究针对这一问题, 对比分析了几种再生水深度处理工艺的处理效果, 及其对含水层净化效果的影响, 从而选择最适宜的用于回灌的再生水预处理工艺.

收稿日期: 2011-04-30; 修订日期: 2011-06-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07314-008); 国家自然科学基金项目(50878115, 51078211, 50908130)

作者简介: 高涓湍(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水回灌, E-mail: gyt09@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhixinet@tsinghua.edu.cn

目前国内外关于回灌前深度处理的研究很多,越来越多高效的水处理方法被应用于地下水回灌中.常用的深度处理工艺是混凝、沉淀、过滤^[3],当对水质要求更高时采用活性炭吸附、膜过滤、离子交换、高级氧化等技术^[4,5]等.如 Wu^[6]以及 Cikurel^[7]等均研究纳滤对回灌水中污染物的去除. Wu^[8]、Kazner^[9]等分别将纳滤与臭氧及纳滤与活性炭结合探索其对地下水回灌的预处理效果. Gong 等^[10]在回灌前采用注入 SO₂ 改善回灌水质.上述工艺各有利弊,混凝沉淀等主要去除大颗粒有机物,一般需与其他工艺结合使用.活性炭可有效降低水中的有机酸、腐殖质、三卤甲烷前体物等物质,粉末活性炭对可吸附有机卤素(adsorbable organic halogens, AOX)去除效果很好^[11].纳滤、反渗透等高效的膜工艺,对回灌水中的各种有机物都有较好去除效果,同时具备良好的脱盐性能^[12].但活性炭污染负荷的适应性差、再生复杂^[13],纳滤反渗透工艺能耗大、成本高、易受污染,这些问题制约了其在回灌水预处理工艺中的广泛使用.

磁性离子交换树脂(magnetic ion exchange resin, MIEX)是以聚丙烯为母体的季铵型离子交换树脂^[14]. MIEX 对天然有机物(natural organic matter, NOM)有明显的去除效果^[15, 16],尤其是对于具有较强紫外吸收[SUVA(specific ultraviolet absorbance) > 3.0 L·(m·mg)⁻¹]的 NOM^[17]. MIEX 能有效去除中间相对分子质量段(500 ~ 1 500)的 DOC^[18],根据水质条件不同, MIEX 对 DOC 的去除率可达 30% ~ 70%.作为阴离子交换树脂, MIEX 可与水中带负电的有机物或无机盐发生交互反应,去除一些难降解的有机物,是一种非常有前景的水处理技术,可用于回灌前的预处理.

近年来,臭氧氧化技术在水处理中得到了广泛的应用^[19],较低投加量的臭氧氧化就可以有效的氧化难降解有机物,去除 UV 吸收物等^[20].超滤膜可分离

胶体大分子、颗粒物、细菌病毒以及微生物等^[21, 22],且具有节能高效、无二次污染、产水量大等优点.我国的许多水厂使用超滤(UF)作为水处理工艺,研究 UF 作为回灌前处理工艺有较大的现实意义^[23].

水处理中将不同工艺组合起来往往能够发挥协同作用.如活性炭-膜技术,能够互补去除更多的有机物,亦能缓解活性炭与膜的堵塞^[24].磁性离子交换树脂-混凝沉淀,既可更有效去除有机物,也能节约磁性离子交换树脂与混凝剂的用量^[25].在本实验中,磁性离子交换树脂作为前处理,可以去除一些难降解的有机物,以及中间相对分子质量段(500 ~ 1 500)的 NOM,可减少后续臭氧氧化的臭氧投加量^[17].同样,UF 可去除一些大分子量有机物,可减轻后续臭氧氧化负担.因此本研究中,将 MIEX、UF 分别与 O₃ 组合作为预处理工艺,并与单独工艺的处理效果进行对比,探索组合工艺作为回灌预处理工艺的优势.

上述各种再生水深度处理技术,在去除污染物方面各具特色,但各种工艺与土壤含水层净化效果的互补性还不清楚,其作为再生水回灌前的预处理工艺的优劣还不能确定.因此,本研究选择磁性离子交换树脂、臭氧、超滤以及其组合工艺用于再生水回灌前的预处理,尤其是磁性离子交换树脂,将其作为回灌前预处理工艺的研究还非常少,值得开展相关研究.通过长期研究考察各套工艺对再生水的净化效果,及其与土壤含水层净化能力的互补性,确定适宜的再生水回灌预处理工艺.

1 材料与方法

1.1 实验用水

实验用水采用高碑店污水厂二级出水,采用 5 μm 的微滤膜过滤以截留二级出水中残留的粗大悬浮物或漂浮杂质后作为原水使用.二级出水水质参数见表 1.

表 1 高碑店二级出水的水质参数

Table 1 Water quality of the secondary effluent from GBD

项目	DOC/mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /abs·m ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹
实验原水	4.24 ~ 7.56	11.2 ~ 13.8	0.31 ~ 5.58	19.7 ~ 31.2

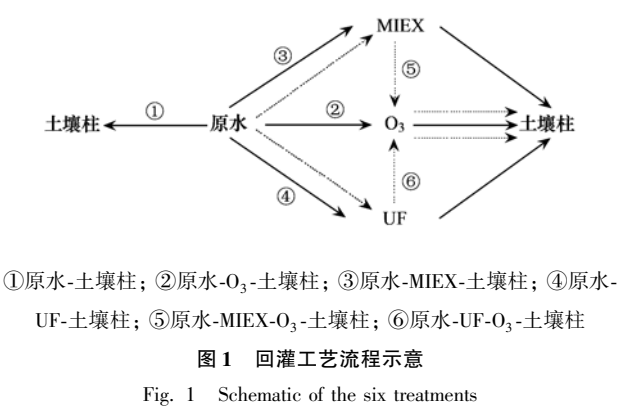
1.2 实验工艺流程

本研究共设计 6 条工艺路线进行再生水回灌模拟实验,见图 1. ①原水直接回灌; ②原水经臭氧氧化后回灌; ③原水经磁性树脂处理后回灌; ④原水经过 UF 后回灌; ⑤原水经过 MIEX 和臭氧组合工

艺处理后回灌; ⑥原水经过 UF 和臭氧组合工艺处理后回灌.

1.3 实验装置和工艺参数

土壤柱内径 5 cm, 填充高度 50 cm, 填充体积 1 000 mL, 采用 GB178-77 水泥强度试验用标准砂装



填,空隙度 39.5%,粒径 0.25 ~ 0.65 mm,孔隙率约 40%,柱内实际存水量 400 mL,流速控制在 0.02 mL·min⁻¹,停留时间为 20 d.经预处理工艺的再生水通过蠕动泵达到土壤柱顶端进入土壤柱,再加上重力作用到达土壤柱底部,通过出水口排出.

预处理工艺参数:

臭氧投加量 (O₃/DOC) 为 0.6 mg·mg⁻¹; 磁性树脂投加量为 5 mL·L⁻¹; 超滤膜截留相对分子质量为 1 × 10⁴,压差为 0.5 MPa.

1.4 分析项目及研究方法

再生水水质参数和研究方法见表 2.

表 2 分析方法	
Table 2 Analytical methods for water quality	
分析项目	测量方法
DOC	岛津 TOC-VWP 总有机碳分析仪
UV ₂₅₄	岛津 UV 3100 型分光光度计
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂光度法 (GB 7479-87)
NO ₃ ⁻ -N	紫外分光光度法

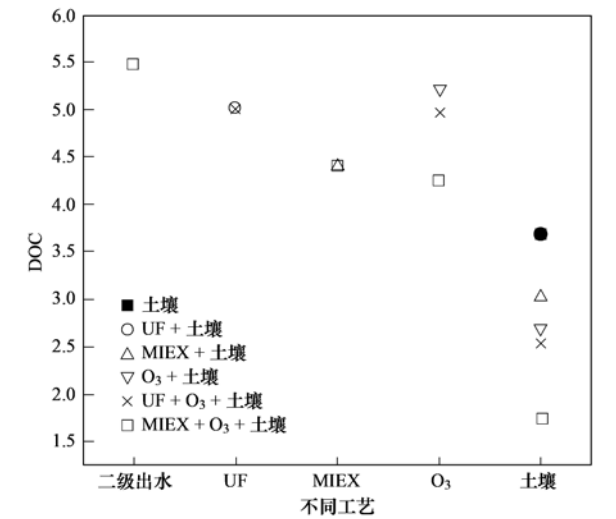
2 结果与讨论

2.1 不同工艺及土壤柱对 DOC 的去除效果

二级出水经不同工艺预处理及土壤处理后,其 DOC 浓度变化情况如图 2 所示.5 种预处理工艺(臭氧、MIEX、UF、MIEX 臭氧组合和 UF 臭氧组合)对二级出水中 DOC 的去除率分别为 4.5%、19.3%、8.4%、21.8% 和 9.1%.即 MIEX 和 MIEX-O₃ 工艺对二级出水 DOC 的去除相对较好,大约在 20% 左右,其他工艺处理效果不明显. UF 只对相对分子质量 1 × 10⁴ 以上的较大分子有截留作用,推测相对分子质量 > 1 × 10⁴ 的大分子溶解性有机物在高碑店二级出水含量较小,仅占 DOC 的 8% 左右.与 UF 不同,MIEX 对中等分子量的有机物具有较好的去除

效果,因此其对二级出水的 DOC 的去除较为明显.在本研究的臭氧投加量下,二级出水中的有机物不能被完全氧化,因此臭氧对 DOC 无明显去除.

土壤能进一步降低回灌水中 DOC 浓度,去除率在 30% ~ 53% 的范围之间.土壤柱对 6 种经过不同预处理(无处理、臭氧、MIEX、UF、MIEX 臭氧组合和 UF 臭氧组合)的回灌水中 DOC 的去除率分别为 32.3%、44.2%、25.4%、24.3%、48.2% 和 46.2%.对比分析可知,臭氧及其组合预处理的模式下,土壤对 DOC 的去除率显著高于无预处理模式,说明臭氧氧化能显著提高二级出水的可生化性,提高土壤对污染物的去除能力.与此相反,MIEX 和 UF 预处理降低了土壤对 DOC 去除能力,这说明 MIEX 和 UF 工艺所去除的有机物与土壤可去除有机物部分重合,导致后续土壤去除能力降低,即这 2 种预处理的单独使用不能与土壤处理形成较好的互补性.2 种组合工艺预处理后,土壤柱对 DOC 的去除能力较单独臭氧预处理情况下略有升高,说明 MIEX 与 O₃、UF 与 O₃ 结合作为预处理工艺存在一定的互补优势.



数据为半年测量的平均值,下同

图 2 不同工艺出水中的 DOC 浓度

Fig. 2 Concentration of DOC after different treatments in the reclaimed water

2.2 不同工艺及土壤柱处理后 SUVA 分布

比紫外吸光度 (SUVA) 即 UV₂₅₄/DOC,表示单位 DOC 的有机物中具有非饱和构造成分的多寡,是表征水中天然有机物 (NOM)^[26] 和消毒副产物性质^[27] 的重要指标. SUVA 能在一定程度上反映出有机物的可生化性.各工艺条件下,二级出水中 SUVA

值的变化规律如图 3 所示。

在 5 种预处理工艺中,臭氧及其组合工艺能显著降低二级出水中的 SUVA 值,去除率为 60% ~ 79%,MIEX 处理能降低约 10% 的 SUVA 值,而 UF 对 SUVA 值的改变无显著效果。臭氧对 SUVA 的效果,取决于其对水中 C=C 有机物的氧化作用;而 MIEX 可以选择性吸收部分具有 UV 吸收的有机物。臭氧和 MIEX 的联合工艺对 SUVA 的去除率高达 79%,显著高于单独处理工艺,说明这 2 种工艺的组合能起到互补和加强的效果。

经过土壤处理后,各水样的 SUVA 值均迅速上升,6 种预处理(无处理、臭氧、MIEX、UF、MIEX 臭氧组合和 UF 臭氧组合)的回灌水经土壤处理后 SUVA 的增加值分别为 0.31、0.81、0.37、0.32、1.01 和 0.88,其中臭氧及其组合预处理工艺最为突出,表明这些预处理工艺后回灌水被土壤进一步净化的程度更大,相反,MIEX 和 UF 预处理后的变化规律与此不同。对比土壤柱出水的 SUVA 值可知,臭氧及其组合预处理工艺条件下最终出水 SUVA 较低,说明其仍具有较好的可生化性,相对具有更大的净化潜力。

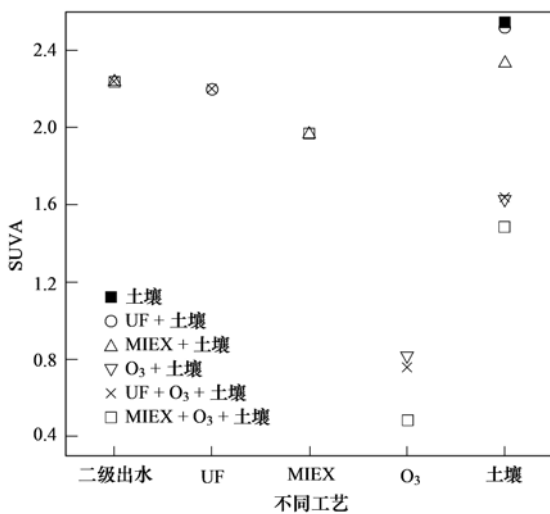


图 3 不同工艺及土壤柱处理后 SUVA 值

Fig. 3 SUVA of reclaimed water after different treatments

2.3 不同工艺及土壤柱对 NO₃⁻-N 的去除效果

NO₃⁻-N 是衡量水质状况的常用参数,在各处理工艺条件下 NO₃⁻-N 变化规律如图 4 所示。5 种预处理工艺中,仅 MIEX 及其组合工艺对二级出水中的 NO₃⁻-N 有较为明显的去除效果,去除率在 25% 左右。MIEX 作为阴离子交换剂,可通过离子交换作用去除水中部分阴离子。

经过土壤柱之后 NO₃⁻-N 浓度均略有上升。这可能是因为硝态氮与土壤表层同带负电荷,不易被吸附;且实验条件下土壤中未发生明显的反硝化作用,而发生了 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N 的硝化作用。即实验条件下,土壤系统对 NO₃⁻-N 的去除不显著。

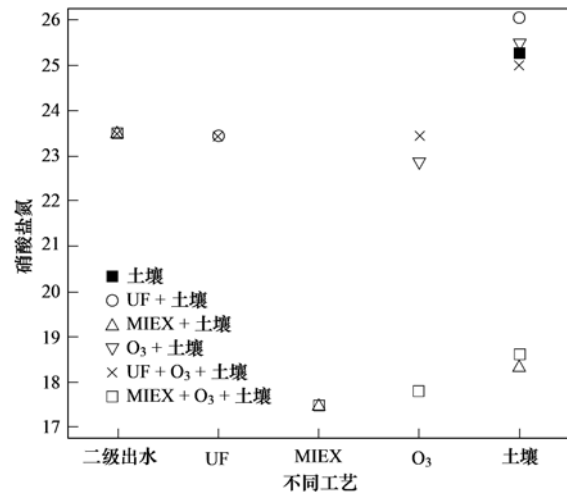


图 4 不同工艺及土壤柱出水中 NO₃⁻-N 的浓度

Fig. 4 Concentration of NO₃⁻-N of the reclaimed water after different treatments

2.4 不同工艺及土壤柱对 NH₄⁺-N 的去除效果

二级出水中 NH₄⁺-N 浓度约为 1.8 mg·L⁻¹,臭氧氧化作用能使其降低至 0.5 mg·L⁻¹,而其他工艺对 NH₄⁺-N 无明显去除效果。土壤能有效降低 NH₄⁺-N 浓度,最终出水中 NH₄⁺-N 均降至 0.5 mg·L⁻¹ 以下。因此,土壤能高效去除 NH₄⁺-N, NH₄⁺-N 不应成为预处理工艺选择的主要因素。

3 结论

本研究对比分析了 5 种常用的再生水深度处理工艺,尤其是其作为地下水回灌预处理工艺的可行性。通过长期运行分析可知,臭氧投加量 (O₃/DOC) 为 0.6 mg·mg⁻¹ 时,即能显著提高二级出水的可生化性,促进土壤对回灌水有机物的去除效果,使最终出水的 DOC 达到 1 ~ 2 mg·L⁻¹ 的水平。MIEX 在投加量为 5 mL·L⁻¹ 时,能去除二级出水中 25% 的 NO₃⁻-N。土壤处理对 NO₃⁻-N 无显著去除效果,但能有效地去除 NH₄⁺-N。综合对比分析,臭氧以及臭氧 MIEX 组合工艺,能显著提高二级出水的可生化性,并去除部分 NO₃⁻-N,与后续土壤处理具有较好的互补性,较适合用作地下回灌前处理工艺。

参考文献:

- [1] 张峰, 刘晓云. 城市污水回用的现状与展望[J]. 上海化工, 2006, **31**(7): 33-35.
- [2] Zhang Z X, Qian Y. Water saving and wastewater reuse and recycle in China[J]. Water Science and Technology, 1991, **23**(10): 2135-2140.
- [3] 靳君, 张聪璐. 深度处理城市污水厂出水的实验研究[D]. 沈阳: 沈阳环境科学研究院, 2005.4-7.
- [4] Sohn J, Amy G, Cho J, Lee Y, *et al.* Disinfectant decay and disinfection by-products formation model development: chlorination and ozonation by-products [J]. Water Research, 2004, **38**(10): 2461-2478.
- [5] 王允妹. 城市污水二级处理出水地下回灌深度处理技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [6] Wu L L, Zhao X, Zhang M. Studies on the integration of nanofiltration and soil treatment for municipal effluent reclamation as a groundwater supplement[J]. Water Environment Research, 2010, **82**(1): 20-26.
- [7] Cikurel H, Sharma S K, Jekel M, *et al.* Alternative hybrid SAT-membrane treatment; Short SAT-NF treatment to upgrade effluent quality[A]. In: Proceedings of the IWA Regional Conference. Membrane Technology and Water Reuse[C]. Istanbul, Turkey, 2010. 193-205.
- [8] Wu L L, Zhao X, Zhang M. Removal of dissolved organic matter in municipal effluent with ozonation, slow sand filtration and nanofiltration as high quality pre-treatment option for artificial groundwater recharge[J]. Chemosphere, 2011, **83**(5): 693-699.
- [9] Kazner C, Wintgens T, Melin T, *et al.* Comparing the effluent organic matter removal of direct NF and powdered activated carbon/NF as high quality pretreatment options for artificial groundwater recharge[J]. Water Science & Technology, 2008, **57**(6): 821-827.
- [10] Gong T, Harmon J. Groundwater recharging wastewater disposal method and apparatus [P]. United States Patent Application; 2010/0230363 A1, 2010-09-16.
- [11] 皮运正, 王桂春. 活性炭深度处理工艺用于地下水回灌的水质研究[J]. 环境科学研究, 2001, **14**(5): 27-30.
- [12] 吴琳琳, 赵璇, 张猛. 用于地下水回灌的再生水纳滤深度处理[J]. 清华大学学报, 2009, **49**(12): 2007-2008.
- [13] 皮运正, 吴天宝. 活性炭吸附用于城市污水地下回灌技术的研究[J]. 中国给水排水, 1999, **15**(10): 5-8.
- [14] Boyer T H, Singer P C. Bench-scale testing of a magnetic ion exchange resin for removal of disinfection by-product precursors [J]. Water Research, 2005, **39**(7): 1265-1276.
- [15] Bayer T H, Singer P C. A pilot-scale evaluation of magnetic ion exchange treatment for removal of natural organic material and inorganic anions [J]. Water Research, 2006, **40**(15): 2865-2876.
- [16] Johnson C J, Singer P C. Impact of a magnetic ion exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment [J]. Water Research, 2004, **38**(17): 3738-3750.
- [17] Mergen M R D, Jefferson B, Parsons S A, *et al.* Magnetic ion-exchange resin treatment; impact of water type and resin use [J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 1982-1983.
- [18] Wert E C, Edwards-Brandt J C, Singer P C, *et al.* Evaluating Magnetic Ion Exchange Resin (MIEX)[®] Pretreatment to Increase Ozone Disinfection and Reduce Bromate Formation [J]. Ozone-Science & Engineering, 2005, **27**(5): 371-379.
- [19] 赵金辉, 陈卫, 林涛. 臭氧高级氧化技术在饮用水安全保障中的作用[J]. 给水排水, 2007, **33**(6): 117-119.
- [20] 刘晓基, 曹仲宏, 杜琦. 臭氧在再生水处理中的应用[J]. 天津建设科技报, 2004, **14**(4): 48-50.
- [21] 王静, 张雨山. 超滤膜和微滤膜在污(废)水处理中的应用研究现状及发展趋势[J]. 工业水处理, 2001, **21**(3): 4-7.
- [22] Arnal J M, Sancho M, Verdú G, *et al.* Selection of the most suitable ultrafiltration membrane for water disinfection in developing countries [J]. Desalination, 2004, **168**(15): 265-270.
- [23] 李圭白, 杨艳玲. 超滤——第三代城市饮用水净化工艺的核心技术[J]. 供水技术, 2007, **1**(1): 1-3.
- [24] 沈渊玮, 陆善忠. 活性炭在水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2007, **27**(4): 13-16.
- [25] Singer P C, Bilyk K. Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin [J]. Water Research, 2002, **36**(16): 4009-4022.
- [26] 杨岸明, 常江, 甘一萍, 等. 臭氧氧化二级出水有机物可生化性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 363-364.
- [27] 赵振业, 肖贤明, 李丽, 等. 水体中不同相对分子质量有机质对饮用水消毒的影响[J]. 环境科学, 2002, **23**(6): 42-51.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人