

曹楠, 苗婷婷, 李魁晓, 等. 2009. 城市污水中的生物毒性及其臭氧削减效果研究 [J]. 环境科学学报, 29 (4): 747– 753
Cao N, Miao T T, Li K X, *et al.* 2009. Residual biotoxicities in the secondary effluents of municipal sewage treatment plants and effects of ozonation on toxicity reduction [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29 (4): 747– 753

城市污水中的生物毒性及其臭氧削减效果研究

曹楠¹, 苗婷婷^{1, 2}, 李魁晓¹, 杨敏^{1*}, 张昱¹, 广十淳二³, 荒金淳³

1 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085
2 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083
3 三菱电机先端技术研究所, 日本大阪 661-8661
收稿日期: 2008-05-27 录用日期: 2009-02-03

摘要: 分别利用酵母双杂交和 *umu* 试验对 5 个城市 9 个污水处理厂进出水中生物遗传毒性和视黄酸受体 (RAR) 结合活性进行了调查, 并考察了臭氧氧化对这两种生物效应的去除效果. 结果表明, 城市污水中存在不同程度的生物遗传毒性和视黄酸受体 (RAR) 结合活性, 通过生物处理可以大幅削减污水中的 RAR 结合活性和生物遗传毒性, 但污水厂出水中仍然普遍具有遗传毒性, 部分残留 RAR 结合活性. 5~ 10 mg L⁻¹ 的臭氧可以有效削减二级出水中残留的 RAR 结合活性和遗传毒性, 是一种有效的提高水质安全性的污水深度处理技术.
关键词: 污水回用; RAR 结合活性; 生物遗传毒性; 臭氧

文章编号: 0253-2468 (2009) 04-747-07 中图分类号: X 703. 1 文献标识码: A

Residual biotoxicities in the secondary effluents of municipal sewage treatment plants and effects of ozonation on toxicity reduction

CAO Nan¹, MIAO Tingting^{1, 2}, LI Kuixiao¹, YANG Min^{1*}, ZHANG Yu¹, Junji Hirotsu³, Jun Aragane³

1 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
2 Material Science and Technology Institute, Beijing Forestry University, Beijing 100083
3 Mitsubishi Electric Corporation Advanced Technology R&D Center, Amagasaki Hyogo 661-8661, Japan
Received 27 May 2008 **accepted** 3 February 2009

Abstract The agonistic activity of retinoic acid receptor (RAR) and the genotoxicity induced by the influent and effluent from 9 sewage treatment plants (STPs) in different cities were investigated and the efficiency of ozonation for the removal of the toxicity was evaluated. Raw sewage contains relatively high RAR agonistic activity and genotoxicity. Traditional biological treatment reduces the RAR agonistic activity and genotoxicity, but all of the investigated secondary effluents were still genotoxic, while the effluents from some plants still had weak RAR agonistic activity. Ozonation at an ozone dose of 5~ 10 mg L⁻¹ (in consumption base) almost completely removed the RAR agonistic activity and genotoxicity.
Keywords wastewater reclamation; RAR agonistic activity; genotoxicity; ozonation

1 引言 (Introduction)

城市污水再生利用是我国解决北方城市水资源短缺的重要途径之一, 而再生水的水质安全保障是污水再生利用中的关键问题. 城市污水来源广

泛, 成分非常复杂, 对所有可能的污染成分进行逐一分析不太现实, 因此, 如何评价再生水的水质风险也是一个重要的科学问题. 近年来, 用于综合评价水中各种生物效应的生物测试方法越来越成熟, 成为复杂水体风险评价的一个非常重要的补充手

段. Ames试验是用于评价水体遗传毒性的经典方法,在世界范围内得到认可和应用. 后来出现的 SOS *umu* 试验是 Oda等 (1985)根据 DNA 损伤时诱导 SOS反应表达 *umuC* 基因这一基本原理建立起来的一种新的遗传毒性检测方法,由于其具有快速、敏感、简便、廉价等优点,近年来受到越来越广泛的应用. Reifferscheid等 (1996)对比分析分别用 SOS/*umu* 试验和 Ames试验测定的 274种化合物的遗传毒性结果,发现两者大约有 90% 的一致性, *umu* 试验对 179种致癌物阳性预测值高达 93%. SOS/*umu* 方法已被确立为 ISO 标准体系中用于监测环境水的生物遗传毒性的标准方法.

视黄酸 (Retinoic Acid RA)是维生素 A 在生物体内的活性形式之一,控制着脊椎动物整个生命周期中的细胞分化、增生和凋亡 (王尔松, 1999). RA 在临床上用于对皮肤病、白血病、糖尿病及肿瘤的治疗. 研究发现 RA 可引起包括人在内的多种动物胚胎发育畸形 (李增刚, 2004), 其生物活性由一系列视黄酸受体 (Retinoic Acid Receptor RAR)和视黄素受体 RXR (Retinoid X Receptor RXR)及其配体介导实现,其中 RAR起主要作用 (Michael *et al*,

1999). 一些研究证明,能够同 RAR 结合的外源配体为强致畸物,北美洲多处发现的青蛙发育畸形被怀疑同其栖息的水体中外源 RA 含量过高有关 (Gardiner *et al*, 2003). Nishikawa等将含人类 RAR (α , β , γ)基因的质粒导入酵母菌,构建了检测 RA 受体活性的酵母菌双杂交测试方法,可以用于对环境样品及化学物质的 RAR 结合活性的评价 (Kanata *et al*, 2008).

本研究采用酵母双杂交和 *umu* 试验对 5个城市 9个污水处理厂进出水中生物遗传毒性和视黄酸受体 (RAR)结合活性进行了调查,并考察了臭氧氧化对这两种生物效应的去除效果,以期为再生水的水质安全保障提供基础数据和技术支持.

2 试验材料与方法 (Material and methods)

2.1 样品采集

对国内 5个城市 9座污水处理厂的进出水进行采样. 进水采样点位于污水厂总进水口或初沉池的前端,出水采样点位于水厂最终处理单元的出水. 各厂基本信息见表 1.

表 1 采样污水处理厂的基本信息
Table 1 General information on the investigated wastewater treatment plants

城市	序号	工艺简介	工业废水比例	设计处理水量 / (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	采样日期
北京	A	AAO工艺	20%	100	2006. 7
	B	氧化沟工艺	5%	20	2006. 7
	C	倒置 AAO工艺	30%	10	2006. 7
上海	D	活性污泥法	40%	7	2006. 12
	E	AO+生物滤池	10%	7.5	2006. 12
	F	AO	30%	10	2006. 12
深圳	G	AB法	25%	10	2006. 12
广州	H	AAO	20%	20	2007. 1
天津	I	AO	50%	15	2007. 11

2.2 批量臭氧氧化实验

批量臭氧氧化实验采用石英玻璃管 (60 mm × 1.5 m)作为臭氧接触反应器,臭氧发生器 (OSIN, Mitsubishi Electric 日本)产生的臭氧气体经过在线臭氧浓度检测器 (Hare EG-600 Jitsugyo 日本)后通过石英管底部的砂板扩散器与水样接触. 臭氧尾气由 KI溶液吸收后,用硫代硫酸钠溶液滴定确定尾气臭氧含量,然后计算出臭氧消耗量.

2.3 水质分析与样品预处理

水样 COD_{Mn}、NH₄⁺-N 和粪大肠杆菌分析方法参照标准分析方法 (中国国家环境保护总局编委会,

2002). 水样经过 0.45 μm 滤膜过滤,滤出液 DOC 测定采用总有机炭分析仪 (Phoex8000 Tamar-Dohmann 美国), 254 nm 处紫外吸收值和色度测定采用紫外-可见分光光度计 (UV 3100 Hitachi 日本), 重金属分析采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (OPTMA2000 PerkinElmer 美国).

用于生物测试的样品预处理方法: 取 2 L 水样经玻璃纤维滤膜 (GF/C, Whatman 英国)过滤后用 HLB 柱 (6 mL, 500mg Waters 美国)在固相萃取装置 (Waters 美国)上进行固相萃取,依次用 10 mL 甲醇 (HPLC 级; Fisher Chemicals 美国)和 10 mL 超

纯水活化 HLB小柱后,水样以大约 $5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度通过固相萃取小柱.上样结束后用 10 mL 超纯水淋洗小柱,然后用氮气将小柱吹干再用 10 mL 甲醇洗脱,洗脱液用微弱的氮气吹干,再用二甲基亚砩 (DMSO, ACS级, Amresco 美国)定容到 0.05 mL 进行生物测试.

2.4 RAR 结合活性试验方法

本实验利用酵母双杂交方法 (Nishikawa *et al*, 1999)测定水样的 RAR 结合活性,试验用酵母菌株 *Saccharomyces cerevisiae* Y190由日本大阪大学提供,菌株上接有人类 RAR α 质粒和共激活子 pGAAD424-TIF-2 同时引入了 galactosidase 报告基因.通过 RA 配体诱导激活受体基因,同时激活报告基因,转录成 β -半乳糖苷酶,通过测定 β -半乳糖苷酶来检测样品中的 RAR 结合活性.试验中 DMSO 作为阴性对照,全反式视黄酸 (All-trans-retinoic acid 99%, Sigma St Louis 美国)作为阳性对照,每个样品 3 个重复.最后通过下式计算 β -半乳糖苷酶诱导活性值 (IU):

$$IU = 1000 \times \frac{OD_{415} - 1.75 \times OD_{570}}{t \times v \times OD_{595}} \quad (1)$$

式中, t 为加入 ONPG 显色时间 (min); v 为反应菌液在显色过程中的稀释倍率.

2.5 SOS *umu* 试验方法

浓缩后样品的遗传毒性通过 SOS *umu* 试验测定,具体方法参考文献 (Hu *et al*, 2007; ISO 13829, 2000).试验菌株 *Salmonella typhimurium* TA1535/pSK1002由日本大阪府立公众卫生研究所提供.产生 β -半乳糖苷酶的 LacZ 结构基因与操纵子 *umuC* 基因融合,通过 pSK1002 质粒携带整合于鼠伤寒沙门氏菌 TA1535 菌株的 DNA 中,菌体 DNA 受外缘性物质损伤后产生 SOS 反应,促使 LexA 阻

遏蛋白发生自溶解,启动 *umuC* 基因操纵子,带动 LacZ 基因转录翻译表达,生成 β -半乳糖苷酶,根据该酶被诱导产生的量判定受损的程度.试验中 DMSO 作为阴性对照,4 硝基喹啉-N-氧化物 (4NQO, Fisher Chemicals 美国)作为阳性对照,每个样品 3 个重复.最后通过式 (1) 计算 β -半乳糖苷酶诱导活性值 (IU).

遗传毒性的强弱用样品诱导值与阴性对照值的诱导比率 (R) 表示.若 $R \geq 2$ 表示该样品遗传毒性效应呈阳性; $R < 2$ 表示遗传毒性效应为阴性.

3 结果 (Results)

3.1 污水厂出水水质常规指标

9 座污水处理厂出水常规水质指标的分析结果如表 2 所示.调查发现,除了 I 厂外,其他水厂有机物去除效果都比较好,出水 COD_{Mn} 和 DOC 分别在 $6.5 \sim 15.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.3 \sim 10.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的范围内,但出水均有一定的色度 ($11 \sim 21$ 度). I 厂出水有机物、色度等指标较高是因为接纳了大量纺织工业废水 (50%).除了 D 厂和 H 厂镉浓度超过排放标准值 ($0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 外,其他重金属指标均在排放标准的允许浓度范围内.粪大肠菌群数作为反映出水卫生学指标的基本控制项目,其一级标准 B 级最高允许排放浓度 (日均值) 为 10^4 个 L^{-1} .在 9 座水厂中, A、B、C、D、E、G 和 I 水厂出水粪大肠杆菌浓度普遍高出污水排放一级 B 标准允许浓度 $1 \sim 2$ 个数量级, E 和 H 厂出水经过紫外消毒处理,所以粪大肠杆菌含量较低,但也在排放标准的临界值附近.因此,病原微生物风险也是城市污水再生回用中不容忽视的一个指标.

表 2 污水处理厂二级出水常规指标分析结果
Table 2 Measured routine parameters of the secondary effluents

水厂	COD _{Mn} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DOC /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	UV ₂₅₄ Lm^{-1}	色度 /度	NH ₄ ⁺ -N /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	铬 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
A	8.7	6.7	17.2	16	2.7	0.02
B	7.1	5.3	13.2	11	1.3	0.02
C	10.3	7.3	23.2	19	7.1	0.09
D	15.4	10.4	21.8	21	7.8	0.04
E	6.5	5.1	12.1	15	1.5	0.01
F	9.2	8.7	16.9	18	4.1	0.03
G	8.4	7.3	15.4	17	3.7	ND
H	7.7	8.7	18.6	18	2.9	0.05
I	26.5	22.2	41.4	28	5.9	ND

续表 2

水厂	锌 /(mg L ⁻¹)	铅 /(mg L ⁻¹)	镉 /(mg L ⁻¹)	铜 /(mg L ⁻¹)	大肠杆菌 /LgN(个·L ⁻¹)
A	0.13	0.05	ND	0.01	5.42
B	0.25	0.04	0.01	0.03	4.71
C	0.29	0.03	ND	0.06	5.23
D	0.42	0.07	0.02	0.02	5.81
E	0.16	0.03	ND	0.12	3.78
F	0.38	0.08	0.01	0.01	5.65
G	0.21	0.01	0.01	ND	5.92
H	0.38	0.09	0.02	0.22	4.11
I	0.14	ND	ND	ND	4.85

3.2 遗传毒性

利用 *umu* 方法对浓缩后样品进行不同暴露剂量 (换算为浓缩前水样体积) 下生物遗传毒性的分析, 结果如图 1 所示. 由图中可以看出水厂进水 (初沉) 的遗传毒性普遍呈现强阳性水平, 而且剂量-效应关系表现为随着样品暴露剂量增加毒性先上升后下降的趋势, 主要是进水中污染物浓度过高, 大剂量样品暴露过程中菌株生长受到抑制, 使得其半乳糖苷酶的表达式降低. 出水中遗传毒性大幅下

降, 呈现出较好的剂量-效应关系, 表明经过生物处理后, 水中遗传毒性物质得到很好的去除. 以产生最高诱导活性值的进水暴露剂量为基准, 比较不同水厂对原水遗传毒性的去除效率可以发现, 9 个水厂对遗传毒性的去除效率在 46.6% ~ 74.7% 范围内, 平均去除率为 55.5% ± 11.5%. 不同处理工艺及水厂运行条件对遗传毒性的去除效果有待于进一步的研究.

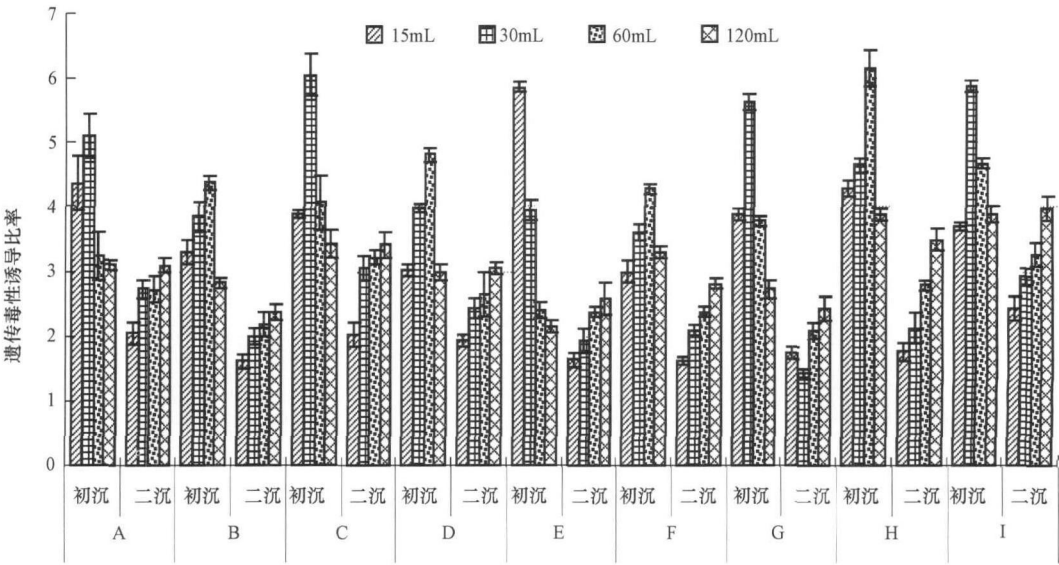


图 1 污水处理厂进出水遗传毒性测试结果

Fig. 1 Genotoxicity test results of STP influents and effluents

对出水的遗传毒性评价结果表明, 15 mL 暴露剂量下的遗传毒性总体呈现阴性或疑似阳性水平; 当暴露剂量增加至 120 mL 时, 9 个水厂出水的遗传毒性普遍呈现阳性, 说明尽管常规的生物处理可以去除部分遗传毒性, 出水仍然具有一定的遗传毒性风险. Dize1(2002)对德国境内地表水和污水进行毒性调查时发现, Saale 河和 Tellow 运河下游河水在 *umu* 试验中呈现阳性或疑似阳性, 推测这可能与沿途接受多个污水处理厂二级出水有关. 因此污水处理厂

出水中残留的有害污染物对接受水体可能造成潜在危害.

3.3 RAR 结合活性

对 A~H 污水处理厂进水和出水的 RAR 结合活性的调查结果如图 2 所示. 由图 2 可以看出除了 D 厂外, 其他水厂进水的 RAR 结合活性都呈现较高的水平, 说明原水中普遍含有具有能同 RAR 结合的配体物质存在. 除了类维生素 A 类物质以外, 环境中很多人工合成的外源性化学物质都是能同 RAR 结合的外

源配体. Kamata等 (2008)对 543种化学物质进行 RAR 结合活性筛选研究,发现许多工业化学品、天然雌激素、个人护理品、除草剂和农药都具有 RAR 结合活性. 国内的一些研究者发现,双酚类、烷基酚类、邻苯二甲酸酯类、有机磷农药、有机氯农药和雌激素等物质都能从城市污水厂进水中检出 (Wang *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2008 金士威等 2005),这些微量污染物中绝大部分都具有 RAR 结合活性 (Kamata *et al.*, 2008),而传统工艺对上述污染物的去除效率各异 (Kong *et al.*, 2008 陈明等, 2006 柳丽丽等, 2003). 环境中人工合成的外源有机物配体通过同细胞核受体结合后会对生物有机体造成不利的影响,其中一些能够同细胞核受体 (例如 RAR、ER) 结合的外源配体已被证明能够导致生物体发育畸形 (Elmazar *et al.*, 1996 Elmazar *et al.*, 2001; Kamata

et al., 2006),医学暴露实验和环境调查已证实了外源配体的生物致畸效应 (Fry *et al.*, 1995 Lamm *et al.*, 1985 Sumpter *et al.*, 1998). 图 2结果表明,传统的处理工艺对原水中的 RAR 结合活性进行了有效去除. 大部分污水厂出水 RAR 结合活性都降低到空白两倍水平以下,但部分污水厂出水 RAR 结合活性仍然明显高过空白水平,说明其出水仍残留有 RAR 结合活性. 虽然外源性有机物配体在生物离体实验 (in vitro assay)中检测的受体亲和能力弱于天然配体,但相同浓度下其对生物有机体的致畸效应明显强于天然配体 (Kamata *et al.*, 2008). 因此,尽管水厂出水的 RAR 结合活性总体较低,仍不能排除回用过程中对接受水体中的生物体造成潜在致畸危害的可能性.

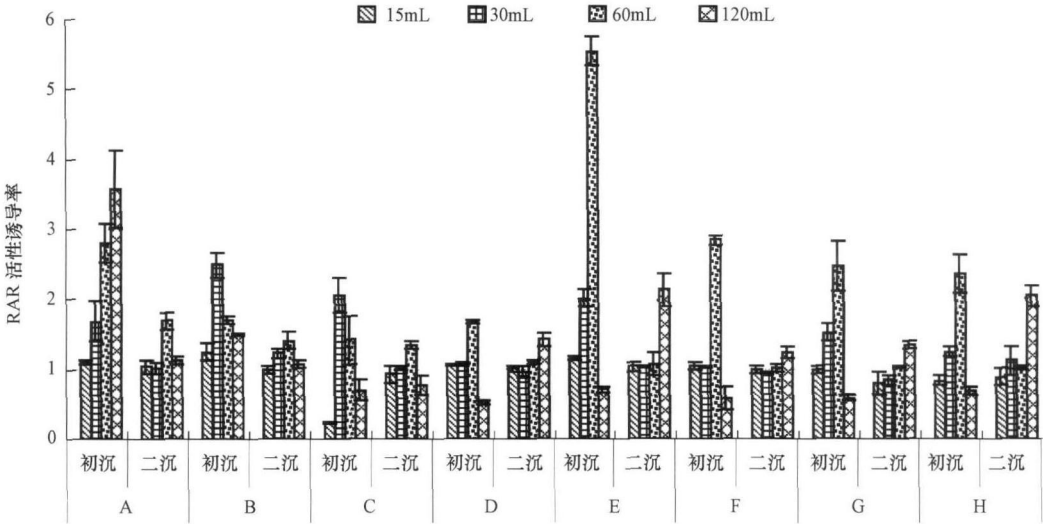


图 2 污水处理厂进出水 RAR结合活性测试结果

Fig 2 RAR activities of STP influents and effluents

3 4 臭氧氧化处理实验

由于臭氧在脱色、除臭、消毒和去除微量有机物等方面的功效 (Takahara *et al.*, 2006),国外许多污水处理厂都采用臭氧氧化技术以提高污水厂出水的综合水质. 本研究选择 A 厂和 C 厂二级出水作为处理对象,考察了臭氧氧化处理对二级出水中 RAR 结合活性和遗传毒性的去除效果. 由图 3 可以看出,在 5 mg·L⁻¹的臭氧消耗量条件下, A 厂和 C 厂出水 60 mL 水样诱导的遗传毒性值都由阳性降低到阴性水平, 120 mL 水样的遗传毒性值也降到阴性和疑似阳性水平,但水样的遗传毒性仍然呈现一定的剂量 ~ 效应关系. 当臭氧消耗量增加至 10 mg·L⁻¹时,水样的遗传毒性进一步降低至空白对照

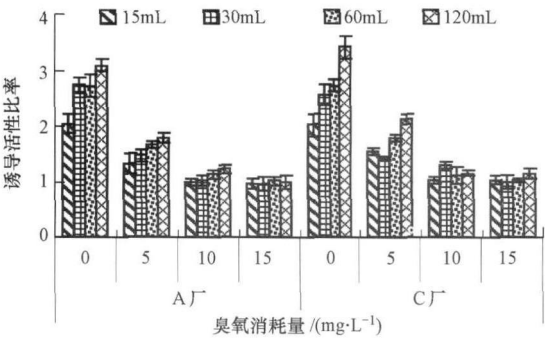


图 3 臭氧对污水厂出水遗传毒性的去除效果

Fig 3 The effect of ozone on the removal of genotoxicity

水平,说明在该剂量下臭氧氧化能有效削减二级出水的遗传毒性.

图4为臭氧对二级出水RAR结合活性的去除效果。由图可以看出臭氧氧化能降低二级出水中残留的RAR结合活性。 5 mg L^{-1} 的臭氧量可以将A厂出水60 mL诱导的RAR结合活性降低到空白对照水平以下,当臭氧量增加到 10 mg L^{-1} 和 15 mg L^{-1} 时,所有暴露剂量下水样的RAR结合活性都低于空白水平。由于C厂出水残留的RAR结合活性相对较低, 5 mg L^{-1} 的臭氧量就非常有效。以上结果表明,臭氧氧化技术不仅能够显著改善再生水的感官指标和卫生学指标,对于各种生物毒性也有很好的去除效果,因此该技术是一种可以综合改善再生水水质的技术。

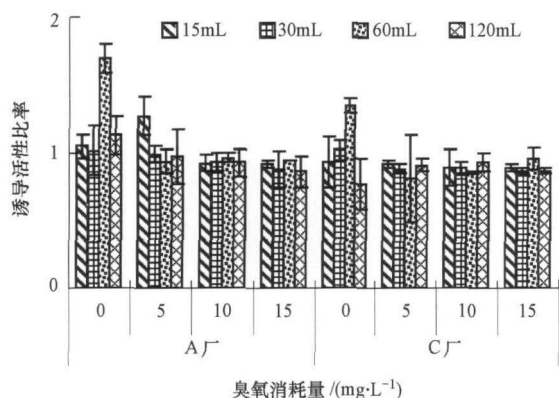


图4 臭氧对污水厂出水RAR结合活性的去除效果

Fig. 4 The effect of ozone on the removal of RAR activity

4 结论 (Conclusions)

1) 污水厂二级出水的重金属风险总体水平较低,但粪大肠杆菌超标排放问题比较普遍,微生物安全风险是污水再生利用中不可忽视的因素之一。

2) 污水厂进水中普遍含有生物遗传毒性和RAR结合活性,传统生物处理能够去除原水中的RAR结合活性和遗传毒性物质,但出水仍普遍具有遗传毒性,部分出水残留一定的RAR结合活性。

3) 臭氧能有效削减二级出水的RAR结合活性和遗传毒性, 10 mg L^{-1} 的臭氧能将出水的RAR结合活性和遗传毒性降低到空白对照水平。

责任作者简介: 杨敏, 中科院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室主任, 研究员, 主要从事水处理和环境微生物研究。

参考文献 (References):

Collins M D, Mao G E. 1999. Teratology of retinoids [J]. Annual Reviews in Pharmacology and Toxicology, 39: 399—430

陈明, 任仁, 王子健, 等. 2006. 城市污水处理厂水样中有机氯农药残留分析 [J]. 环境科学与技术, 29: 37—39

Chen M, Ren R, Wang Z J *et al*. 2006. Residue analysis of organochlorinated pesticides in the water of sewage treatment plant [J]. Environmental Science & Technology, 29: 37—39 (in Chinese)

Dizer H, Wittekindt E, Fischer B *et al*. 2002. The cytotoxic and genotoxic potential of surface water and wastewater effluents as determined by bioluminescence *umu*-assays and selected biomarkers [J]. Chemosphere, 46(2): 225—233

Ehnaz M M, Reichert U, Shmoot B *et al*. 1996. Pattern of retinoid-induced teratogenic effects possible relationship with relative selectivity for nuclear retinoid receptors RAR alpha, RAR beta and RAR gamma [J]. Teratology, 53(3): 158—167

Ehnaz M M, Ruhl R, Nau H. 2001. Synergistic teratogenic effects induced by retinoids in mice by coadministration of a RAR α - or RAR γ -selective agonist with a RXR-selective agonist [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 170(1): 2—9

Fry D M. 1995. Reproductive effects in birds exposed to pesticides and industrial chemicals [J]. Environmental Health Perspectives, 103 (Suppl 7): 165—171

Gardiner D, Ndayibagira A, Gunn E *et al*. 2003. Deformed frogs and environmental retinoids [J]. Pure and Applied Chemistry, 75: 2263—2273

Hu J, Wang W, Zhu Z *et al*. 2007. Quantitative structure-activity relationship model for prediction of genotoxic potential for quinolone antibacterials [J]. Environmental Science & Technology, 41(13): 4806—4812

ISO. 2000. International standard 13829—2000: water quality—determination of genotoxicity of water and waste water using the *umu*-test [S]. Switzerland: International Standard Organisation

金士威, 徐盈, 惠阳, 等. 2005. 污水中8种雌激素化合物的定量测定 [J]. 中国给水排水, 21(12): 94—97

Jin S W, Xu Y, Hui Y *et al*. 2005. Quantitative determination of 8 kinds of estrogenic compound in wastewater [J]. China Water & Wastewater, 21(12): 94—97 (in Chinese)

Kanaka R, Shiraiishi F, Nishikawa J *et al*. 2008. Screening and detection of the in vitro agonistic activity of xenobiotics on the retinoic acid receptor [J]. Toxicology in Vitro, 22(4): 1050—1061

Kanaka R, Takahashi S, Shimizu A *et al*. 2006. In ovo exposure quail assay for risk assessment of endocrine disrupting chemicals [J]. Archives of Toxicology, 80(12): 857—867

Kong X J, Li D, Cao L Q *et al*. 2008. Evaluation of municipal sewage treatment systems for pollutant removal efficiency by measuring levels of micropollutants [J]. Chemosphere, 72(1): 59—66

Lammer E J, Chen D T, Hoar R M *et al*. 1985. Retinoic acid embryopathy [J]. New England Journal of Medicine, 313(14): 837—841

李增刚, 孙开来. 2004. 视黄类受体与视黄酸致畸作用关系 [J]. 遗传, 26(5): 735—738

Li Z G, Sun K L. 2004. Relations between the retinoic acid receptor and teratogenesis of Retinoids [J]. Hereditas (Beijing), 26(5): 735—

- 738 (in Chinese)
- 柳丽丽, 王子健, 任仁, 等. 2003 城市污水处理厂不同工艺段中有
机氯农药残留 [J]. 环境污染治理技术与设备, 4(10): 32—35
- Liu L L, Wang Z J, Ren R, *et al*. 2003 Residues of organochlorinated
pesticides in different treatment stages of municipal sewage treatment
plants[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution
Control, 4(10): 32—35 (in Chinese)
- Nishikawa J, Saito K, Goto J *et al*. 1999 New screening methods for
chemicals with hormonal activities using interaction of nuclear
hormone receptor with coactivator [J]. Toxicology and Applied
Pharmacology, 154(1): 76—83
- Oda Y, Nakamura S, Oki I *et al*. 1985. Evaluation of the new system
(umu-test) for the detection of environmental mutagens and
carcinogens[J]. Mutation Research, 147: 219—229
- Reifferscheid G, Heil J. 1996 Validation of the SOS/umu test using test
results of 486 chemicals and comparison with the Ames test and
carcinogenicity data[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology, 369
(3-4): 129—145
- Sumpter J P. 1998. Xenoendocrine disrupters-environmental impacts[J].
Toxicology Letters, 102-103: 337—342
- Sun Q F, Deng S, Huang J *et al*. 2008 Contributors to estrogenic
activity in wastewater from a large wastewater treatment plant in
Beijing, China[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 25
(1): 20—26
- Takahara H, Nakayama S, Tsuno H. 2006 Application of ozone to
municipal sewage treatment[A]. International Conference Ozone and
UV Proceedings[C]. Berlin: 17—23
- 中国国家环境保护总局编委会. 2002 水和废水监测分析方法 (第 4
版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 223—226, 279—281,
704—706
- The Compiling Committee of State environmental Protection
Administration of China. 2002 Monitoring and Analyzing Method of
Water and Wastewater (4th edition) [M]. Beijing: China
Environmental Science Press, 223—226, 279—281, 704—706 (in
Chinese)
- 王尔松. 1999. 视黄酸受体及其信号转导机制[J]. 国外医学. 生理.
病理科学与临床分册, 19(6): 472—475
- Wang E S. 1999 Mechanism of retinoic acid receptor signal mediation
[J]. Foreign Medical Sciences of Pathophysiology and Clinical
Medicine, 19(6): 472—475 (in Chinese)
- Wang Y, Wang Z J, Ma M, *et al*. 2001. Monitoring priority pollutants
in a sewage treatment process by dichloromethane extraction and
triplein-solipem eable membrane device (SPMD) [J].
Chemosphere, 43(3): 339—346