

垃圾渗滤液及膜滤浓缩液生物毒性研究

傅金祥,何 祥,谷文艺,孟海停

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110618)

摘 要 目的 探究渗滤液及膜滤浓缩液生物毒性,找出溶解性有机物组分变化对生物毒性产生的影响规律. 方法 实验采用卤虫作为试验生物,测定垃圾渗滤液及浓缩液对受试生物的24 h、96 h的10%致死浓度 LC_{10} 及半致死浓度 LC_{50} . 通过离子交换的方式去除氨氮与重金属,进而研究渗滤液中有机物的生物毒性. 结果 渗滤液、纳滤浓缩液及反渗透浓缩液24h- LC_{50} 的稀释度分别为17.74%、66.99%、89.33%. 渗滤液及纳滤浓缩液中溶解性有机物24h- LC_{50} 的稀释度分别为70.15%、77.98%. 渗滤液及浓缩液中亲水性有机物 $\rho(96h-LC_{50})$ 分别为332.06 mg/L、504.1 mg/L. 结论 渗滤液生物毒性最强,浓缩液中腐殖酸组分明显提高,亲水性有机物组分毒性有所下降.

关键词 垃圾渗滤液;膜滤浓缩液;卤虫;生物毒性

中图分类号 X703

文献标志码 A

Determination of Acute Toxicity of Landfill Leachate and Membrane Filtration Concentrates

FU Jinxiang, HE Xiang, GU Wenyi, MENG Haiting

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110618)

Abstract: Leachate and concentrates from landfill of Laohuchong Shenyang were selected to determine the toxicity. And the effects of dissolve organic matter on acute toxicity were discussed. Bioassays were conducted recording toxicity against *Artimia salina* as median lethal concentrations (LC_{10} and LC_{50} value) after 24 h and 96 h exposure. To increase the selectivity of organic matters in the measurements, the fractionation was done by using ion exchange to separate ammonium/ammonia and metal ions from wastewater. The results show that the 24h- LC_{50} lethality value of landfill leachate, nanofiltration concentrates and reverse osmosis concentrates were 17.74%, 66.99% and 89.33% respectively, which mean landfill leachate being the most toxicity one. It was found that there was a significant contribution to the acute toxicity emanated from the dissolve organic matter components in the landfill leachate. 24h- LC_{50} lethality value of dissolve organic matter from leachate and NF concentrate were 70.15% and 77.98% respectively. $\rho(96h-LC_{50})$ of hydrophilic from leachate and nanofiltration concentrate were 322.06 mg/L and 504.1 mg/L. The o-

收稿日期:2016-05-09

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2014ZX07202-001);辽宁省环境科研教育“123工程”项目(CEPF2014-123-1-3)

作者简介:傅金祥(1955—),男,教授,主要从事水污染控制理论与技术研究.

verall performance of concentration profile and toxicity in landfill leachate and NF concentrates was that humic substance significantly increased but the acute toxicity of hydrophilic components declined.

Key words: landfill leachate; membrane filtration concentrates; artimia salina; acute toxicity

渗滤液是垃圾在填埋过程中生物降解、降水及垃圾自带水产生的一种高浓度有机废水^[1]。渗滤液组分复杂,主要含有四大类污染物:溶解性有机物 DOM (Dissolve organic matter) (COD、TOC、VFA 等)^[2],金属离子 (Ca、Na、Fe 等)^[3],异性生物质(酚、醇等)^[4]及痕量物质^[5]。若渗滤液排入自然水体或渗入地下水,会对环境产生较大威胁。因此国家于2008 修订了《生活垃圾填埋场污染物控制标准》(GB16889—1997),对渗滤液的排放提出了更加严格的要求。国内外对垃圾渗滤液生物毒性展开了一系列研究,HE Ruo 等^[3]研究表明 Fenton 法在降低垃圾浓缩液中各项污染物指标的同时,对发光细菌 50% 抑制毒性明显降低。刘婷等^[6]对不同季节及填埋年限的垃圾填埋场渗滤液生物毒性进行调查,结果表明渗滤液毒性较强,且随填埋年限的增长渗滤液毒性逐渐降低。Cotman 等^[7-8]对垃圾渗滤液生物毒性和集中预处理方式对垃圾渗滤液生物毒性的影响进行了研究,研究表明渗滤液具有较高生物基因毒性和植物发芽抑制率,通过生物法处理可以有效降低渗滤液生物毒性。Bernard^[9]根据测定渗滤液生物毒性成果展开了渗滤液环境影响风险评价工作。目前针对垃圾渗滤液和其处理过程中产生的浓缩液所具有的生物毒性,渗滤液中富含的 DOM 组分毒性分析却鲜有报道。

渗滤液生物毒性检测用到的指示性生物包括小鼠、鱼类、大型蚤、发光细菌及嗜热四膜虫等^[6,10-13]。卤虫又称丰年虾,属于甲壳动物亚门鳃足纲无甲目,分布于世界各地的盐田及高盐湖中。由于其易获取,世代时间短,分布广泛而备受生物毒性检测试验的青睐^[14-15]。笔者选取沈阳老虎冲垃圾填埋场填

埋过程中产生的渗滤液及该厂渗滤液串联处理工艺“外置式膜生物反应器 + 纳滤(NF) + 反渗透(RO)”中产生的 NF 浓缩液和 RO 浓缩液。渗滤液及浓缩液中盐度含量较高,为避免盐度带来的生物毒害作用,笔者选取卤虫作为毒性试验生物。卤虫作为受试生物,在一定培养条件下测定了三种不同废水的急性生物毒性。同时将渗滤液及 NF 浓缩液中 DOM 组分进行分离,探讨腐殖酸(humic acid, HA)、富里酸(fulvic acid, FA)及亲水性有机物(hydrophilic, HyI)三种有机物组分在渗滤液及 NF 浓液中的生物毒性变化规律。研究表明渗滤液毒性最强,应对其着重监控, NF 浓缩液毒性次之,应通过有效的手段处理后排放或回灌。渗滤液及 NF 浓缩液中溶解性有机物毒性不尽相同,应开展相应的监管措施。

1 材料与方法

1.1 材料

渗滤液采自沈阳老虎冲垃圾填埋场渗滤液贮存坑, NF 浓缩液及 RO 浓缩液分别取自填埋场污水处理车间内纳滤、反渗透浓缩液罐,于 4 ℃ 下保存。DOM 组分分离方法如下:废水首先通过 0.45 μm 滤膜制成 DOM 样品,而后 HA、FA 及 HyI 的分离采用 XAD-8 型树脂分离^[16],具体流程见图 1。分离样品的质量浓度以 COD 值进行表征。因渗滤液及浓缩液当中含有质量浓度较高且具有生物毒性的金属离子及氨氮,为研究 DOM 组分的生物毒性,特选取树脂吸附的方式予以去除。具体方法:废水以 1 mL/min 的流速缓慢通过充满 Chelex 10 型阳离子交换树脂及 1-X₈ 型阴离子交换树脂的层析柱后作为预处理组储备液贮存^[15]。

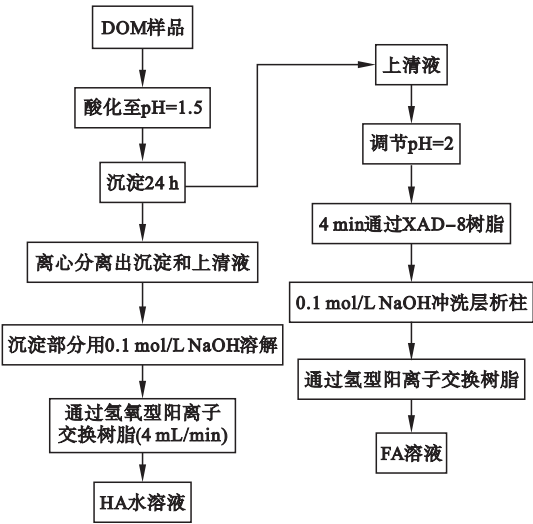


图1 DOM组分分离方法

Fig. 1 Separation method of DOM components

卤虫:购自 Sanders 公司,该公司卤虫产量大,市场占有率高,且对于污染物的急性毒性有较好的代表性. 卤虫至于冰箱中冷冻中保存,取经人工海水孵化 24 ~ 30 h 得卤虫Ⅱ~Ⅲ期无节幼体进行毒性实验^[17],人工海水配方见文献[17].

1.2 水质检测方法

pH 采用 PHS23C 精密 pH 计直接测定; COD 采用重铬酸钾法; BOD₅ 采用 HACH 公司的 BOD₅ TRAK 仪测定; 氨氮采用纳式试剂分光光度法; TP 采用过硫酸钾消解法; 重金属采用 Agilent 公司生产的 7500cx 型电感耦合等离子质谱仪测定.

1.3 毒性试验

先将储备液以人工海水按 5%、10%、20%、40%、60%、80%、100% 比例稀释设置废水试验组, 试验组与空白对照组溶液分别取 10 mL 置于 50 mL 烧杯中, 每个稀释度设置 5 个平行样进行毒性试验. 通过调整废水稀释度, 找到使受试生物卤虫的死亡率到达 100% 的最小稀释值和使卤虫不受影响的最大稀释度. 而后在此范围内进行不同稀释倍数的急性生物毒性实验. DOM 储备液在测定质量浓度值后予以稀释, 实验方法与前述相近. 以 10% 致死浓度 LC_{10} 及半数致死浓度 LC_{50} 表征急性毒性效应. 每个烧杯中放入 10 只卤虫, 于 24 h 及 96 h 记录卤虫死亡情况, 以显微镜下 10 s 内卤虫的附肢停止摆动作为死亡指标. 实验条件如下: 恒温培养箱控制温度为 $(27 \pm 1)^\circ\text{C}$, 光照强度 1 000 Lux. 为消除因盐度变化带来的干扰, 通过外加海盐的方式保持各稀释梯度溶液与孵化液盐度一致.

1.4 分析方法

采用概率单位计算法计算 24 h 和 96 h 的 LC_{50} 、 LC_{10} 及其 95% 置信区间^[18].

2 结果与讨论

2.1 渗滤液及浓缩液水质分析

渗滤液及膜滤浓缩液的水质检测结果见表 1.

表 1 渗滤液及浓缩液的综合理化指标

Table 1 Physical-chemical parameters of landfill leachate and concentrates										
水质指标	pH	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{BOD}_5)/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cd})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cr})/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{As})/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Pb})/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Hg})/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
渗滤液	7.25	12262	3510	1131	6.17	- ^a	185	84.83 ^a	215.5	107.7
NF 浓缩液	8.06	4020	2 ^a	3.4 ^a	2.28 ^a	0.03 ^a	322.9	242.6	199.9	306.3
RO 浓缩液	7.96	845	23 ^a	1.4 ^a	0.05 ^a	- ^a	20.69 ^a	45.8 ^a	204.8	- ^a
出水	7.76 ^a	17.2 ^a	- ^a	- ^a	0.13 ^a	- ^a	0.97 ^a	1.94 ^a	1.87 ^a	- ^a

注: a 指标满足《生活垃圾填埋场污染物控制标准》(GB16889—2008)最高允许排放限值要求.

渗滤液通过“MBR + NF + RO”组合工艺处理后出水水质较好, 但 NF 工艺及 RO 工艺产生的浓缩液不能满足《生活垃圾填埋场污染物控制标准》(GB16889—2008)排放要求. 经过生物处理后渗滤液可生化性明显降低, 渗滤液 B/C 为 0.29, 而 NF 及 RO 浓缩液

的 B/C 仅有 0.000 5 及 0.027. 渗滤液中氨氮含量较高,经 MBR 段处理后其质量分数明显降低. 出水中标准所限重金属质量浓度较低,因其基本富集在 NF 及 RO 浓缩液中.

2.2 渗滤液及浓缩液对卤虫的毒性效应

将渗滤液、NF 浓缩液及 RO 浓缩液按前面稀释方法进行试验,以检测三种废水对卤虫的 24 h 急性生物毒性,并计算回归方程. 实验结果见图 2 及表 2.

渗滤液、NF 浓缩液及 RO 浓缩液的 24 h - LC_{50} 稀释度依次为 17.74%、66.99% 及 89.33%. 渗滤液生物毒性最大,在 40% 稀释度时卤虫即全部死亡,这也凸显了渗滤液这种高浓度的有机废水的环境危害. NF 及

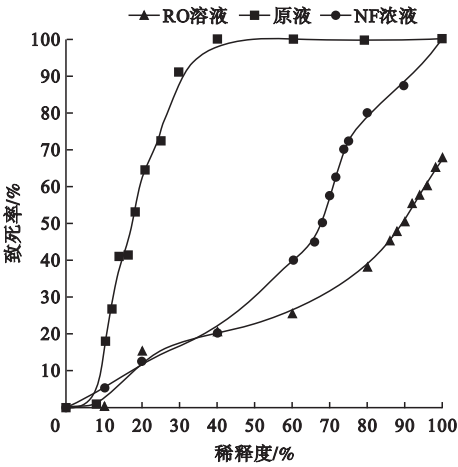


图 2 渗滤液及浓缩液对卤虫的致死率
Fig. 2 Lethality (%) towards *Artemia salina* of landfill leachate and concentrates

表 2 卤虫在渗滤液及浓缩液下的 24h - LC_{50} 稀释度

Table 2 24h - LC_{50} lethality values of landfill leachate and concentrates					
水样	回归方程	R^2	标准误差	稀释度/%	95% 置信限/%
渗滤液	$y = 5.891x - 2.358$	0.957	0.141	17.74	16.24 ~ 19.37
NF 浓缩液	$y = 13x - 19.051$	0.614	0.272	66.99	66.22 ~ 67.76
RO 浓缩液	$y = 7.95x - 10.51$	0.974	0.062	89.33	84.72 ~ 94.19

RO 浓缩液也会对卤虫产生明显影响,但较渗滤液毒性有所降低. 分析其原因为对生物毒害作用大的有机物及氨氮在生物段被大量去除,两种浓缩液中 COD 及氨氮低于渗滤液^[15,19]. 重金属含量在三种废水中分布也不尽相同,总体来看渗滤液及 NF 浓缩液中重金属含量较 RO 浓缩液中重金属含量高. II - III 期卤虫对重金属的耐受性较强^[20],因此即便 NF 浓缩液中部分重金属含量较渗滤液中高但其生物急性毒性较渗滤液低.

2.3 预处理前后渗滤液及 NF 浓缩液对卤虫的生物毒性效应

渗滤液及 NF 浓缩液生物毒性水平较高,因此笔者针对这两种污水进行进一步的毒性分析. 首先将两种废水通过 0.45 μm 滤膜过滤,作为预处理前组. 再将通过阴阳离子交换树脂去除其中的重金属与氨氮,作为预处理后组.

实验结果见图 3. 由图 3 可以看出,渗滤

液通过离子交换树脂前后 24h - LC_{50} 稀释度发生了较大变化. 渗滤液通过滤膜后 COD 浓度有所下降, 24h - LC_{50} 稀释度也从 17.74% 提升至 42.36%. 这是因为渗滤液中 DOM 占有有机物的绝大部分,但其成分复杂,悬浮性固体吸附有大量的有害组分^[21]. 因此将悬浮性污染物去除后,渗滤液生物毒性有所降低. 与通过离子交换树脂后的渗滤液相比 24h - LC_{50} 稀释度提升至 70.15%. 通过树脂后渗滤液中高毒性的氨氮及重金属被去除,但高浓度的有机物含量仍然会对卤虫产生影响. 这与文献[22]的研究结果不太相同,分析其原因为文献中毒性实验的两处填埋场渗滤液中 $\rho(\text{COD})$ 较低,仅有 1 500 mg/L 及 460 mg/L,而沈阳市老虎冲垃圾填埋场渗滤液 $\rho(\text{COD})$ 在 13 000 mg/L 左右,因此毒性差距较大. 就 NF 浓缩液而言,通过 0.45 μm 滤膜过滤后 24h - LC_{50} 稀释度仅从 66.99% 提升至 74.3%,其生物毒性并

未出现显著性差异. 分析其原因为 NF 浓缩液中有机物主要以 DOM 为主, 因此滤膜过滤并未对其生物毒性产生较大的影响. 通过离子交换树脂后的 NF 浓缩液 24h - LC_{50} 稀

释度为 77.98%, 这是由于 NF 浓缩液中氨氮含量不高, 不存在氨氮导致的卤虫致死率. 同时, 可以推断浓缩液中的重金属对卤虫的致死效应不明显.

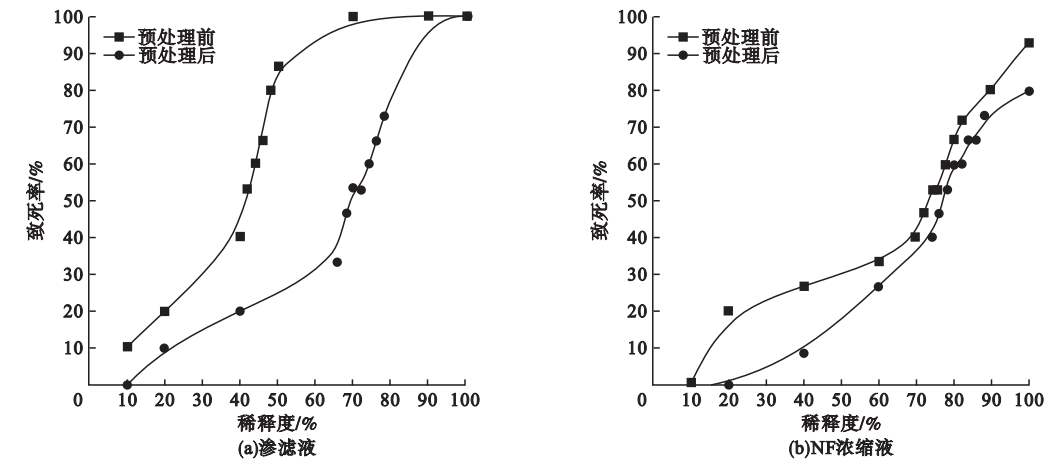


图3 渗滤液及NF浓缩液预处理前后对卤虫的致死率

Fig. 3 Lethality towards *Artemia salina* of untreated and treated leachate and NF concentrates

2.4 溶解性有机物对卤虫的生物毒性效应

通过树脂分离的方式对渗滤液及NF浓缩液中DOM进行了分离, 并对比了未通过离子交换树脂去除氨氮及重金属组的HA、

FA、HyI组分与通过组的 $\rho(24h - LC_{50})$ 离子交换树脂对DOM组分存在一定的吸附作用, 通过离子交换树脂前后DOM组分变化情况见表3.

表3 渗滤液及NF浓缩液离子交换前后DOM变化情况

Table 3 The change of DOM in landfill leachate and concentrated leachate before and after passing ion exchange

处理方式	水样	HA	FA	HyI
未通过离子交换树脂吸附	渗滤液	$RHA_1 = 53.8$	$RFA_1 = 3\ 780$	$RHyI_1 = 2\ 190$
	NF浓缩液	$NHA_1 = 542.4$	$NFA_1 = 2\ 035$	$NHyI_1 = 561.2$
离子交换树脂吸附后	渗滤液	$RHA_2 = 49.5$	$RFA_2 = 3\ 210$	$RHyI_2 = 2\ 100$
	NF浓缩液	$NHA_2 = 521.6$	$NFA_2 = 1\ 910$	$NHyI_2 = 544.5$

通过对渗滤液及浓缩液中的有机物进行分离可以看出, NF浓缩液中HA大量富集, $\rho(HA)$ 从渗滤液当中的53.8 mg/L提升至NF浓缩液中的542.4 mg/L. 大量的难生物降解腐殖酸类物质在浓缩液中占比增大也导致了浓缩液中B/C在极低水平. 总体来看, 预处理前的DOM组分质量浓度要略高于预处理后的DOM组分, 离子交换树脂对某些溶解性有机物存在少许的吸附作用.

对预处理前后的渗滤液及渗滤液DOM组分分别进行卤虫24h - LC_{50} 、24h - LC_{10} 、

96h - LC_{50} 、96h - LC_{10} 急性毒性进行检测, 结果见图4和图5.

从图4可以看出, 渗滤液及浓缩液当中的HA检测不到 $\rho(24h - LC_{10})$ 和 $\rho(24h - LC_{50})$. 腐殖酸一般由生物质经微生物降解产生的大分子有机物, 其本身没有较大的生物毒害作用, 但其易与水体中的重金属络合, 并且是卤化副产物的前驱物, 因此NF浓缩液中大量的HA应予以重视. 渗滤液中FA与浓缩液中FA含量均较高, RFA_1 与 NFA_1 的 $\rho(24h - LC_{10})$ 分别为1 748.76 mg/L与

2 126.81 mg/L, ρ (24h - LC_{50}) 分别为 1 347.72 mg/L及1 653.33 mg/L. 两者差别较大,其主要原因为 RFA₁溶液中含有部分氨氮,同时 FA 对铅的吸附能力较强. 对比 RFA₂ 与 NFA₂ 的 ρ (24h - LC_{10}) 分别为 2 262.9 m/L 及 2 267.83 mg/L, 二者的 ρ (24h - LC_{10})相差无几,这说明 FA 在生物段并未被分解,伴随着 NF 膜的分离作用富集在浓缩液之中,毒性并未发生较大变化. 渗滤液中的 HyI 通过交换树脂前后的

ρ (24 h - LC_{10}) 分别为 817.26 mg/L 及 1 178.1 mg/L, ρ (24h - LC_{50}) 分别为 539.81 mg/L及1 261.37 mg/L,氨氮大量存在于 HyI 渗滤液中,因此通过离子交换树脂前后差别较大. HyI 生物毒性较 FA 要高,是因为 HyI 中含有大量的 -COOH 和 -OH 官能团,该种官能团对生物的毒害作用较大^[23-24]. 通过生物段处理后,该部分有机物被大量的降解吸附,因此 NF 浓缩液中 HyI 含量及生物毒性大幅降低.

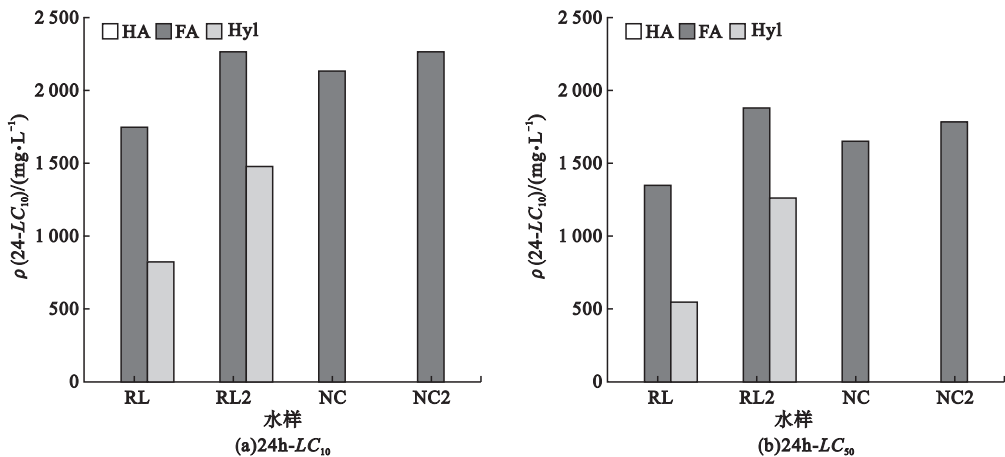


图4 渗滤液及浓缩液中 DOM 组分 24 h 急性生物毒性

Fig. 4 24 h acute toxicity of DOM components from landfill leachate and concentrates

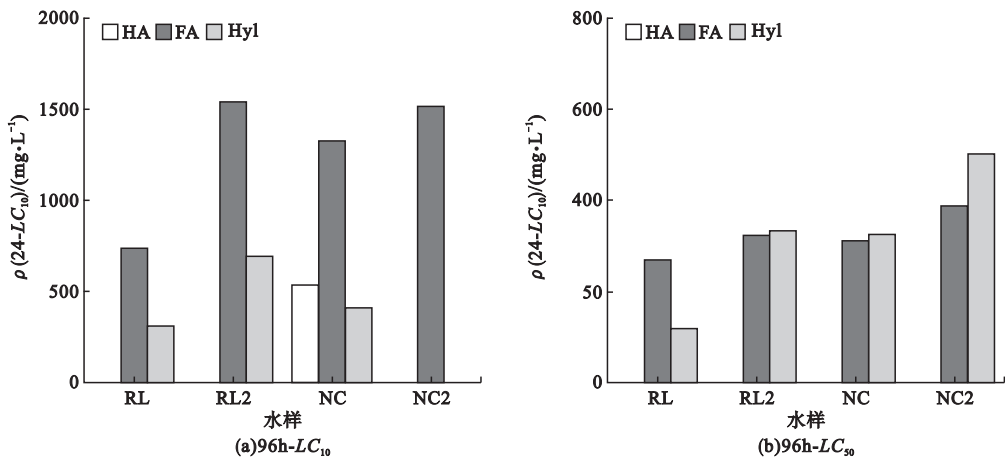


图5 渗滤液及浓缩液中 DOM 组分 96 h 生物毒性

Fig. 5 96 h acute toxicity of DOM components from landfill leachate and concentrates

由图5可以看出,渗滤液及浓缩液中的 HA 组分未检测到 ρ (96h - LC_{50})及 ρ (96h - LC_{10}). 但 NHA₁ 的 ρ (96h - LC_{10}) 为 531.56 mg/L,分析其原因为 HA 对重金属

的络合作用较强,且高浓度的 HA 对卤虫可能存在一定的毒害作用. 渗滤液及 NF 浓缩液中 FA 组分的 ρ (96h - LC_{10}) 分别为 724.61 mg/L 和 323.42 mg/L,通过离子交

换树脂后 $\rho(96h - LC_{10})$ 分别为 1 545.32 mg/L 和 1 508.57 mg/L. RFA_1 及 NFA_1 的 $\rho(96h - LC_{50})$ 分别为 270.12 mg/L 和 310.52 mg/L, 而 RFA_2 及 NFA_2 的 $\rho(96h - LC_{50})$ 分别为 323.86 mg/L 和 388.7 mg/L. FA 的 96 h 生物毒性与 24 h 生物毒性呈现的趋势大致相同, 即未通过离子交换树脂去除氨氮及重金属组致死浓度低于通过离子交换树脂交换树脂组, 渗滤液中的 FA 致死浓度低于 NF 浓缩液中 FA 的致死浓度. 渗滤液及 NF 浓缩液中的 HyI 组分在未通过离子交换树脂去除其中氨氮及重金属污染物时的 $\rho(96h - LC_{50})$ 分别为 118.19 mg/L 及 326.74 mg/L, $\rho(96h - LC_{10})$ 分别为 306.11 mg/L 及 411.26 mg/L. 预处理后 $\rho(96h - LC_{50})$ 分别为 332.06 mg/L 及 504.1 mg/L, $\rho(96h - LC_{10})$ 分别为 694.03 mg/L 及未检测出, 明显表现出渗滤液中的 HyI 组分毒性高于 NF 浓缩液中的 HyI 组分.

3 结 论

(1) 取自垃圾厂填埋过程中产生的渗滤液及渗滤液处理过程中 NF 工艺段产生的浓缩液、RO 工艺段产生的浓缩液表现出不同的生物毒害性. 三种废水对卤虫的 $\rho(24h - LC_{50})$ 致死稀释度分别为 17.74%、66.99% 及 89.33%, 生物毒性大小排序为渗滤液, NF 浓缩液, RO 浓缩液.

(2) 渗滤液当中的非溶解性污染物对卤虫的生物毒性较大, 通过滤膜及离子交换树脂去除氨氮与重金属预处理后渗滤液 24h - LC_{50} 稀释度提升至 70.15%. 而 NF 浓缩液在预处理前后差别不大, 24h - LC_{50} 稀释度仅从 66.99% 提升至 74.3%.

(3) NF 浓缩液中的腐殖质类物质较渗滤液中明显增加, $\rho(HA)$ 由 53.8 mg/L 提升至 542.4 mg/L. 渗滤液 DOM 组分中 HyI 的 $\rho(24h - LC_{50})$ 及 $\rho(96h - LC_{50})$ 分别为

539.81 mg/L, 118.19 mg/L, 而 NF 浓缩液中的 HyI 类物质并未检测到毒性. 生物段对 HyI 类物质去除能力较高, 并且有效地降低了 HyI 类物质中高毒性部分.

参考文献

- [1] MORAIJS L D, ZANMORA P P. Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates [J]. Hazard, 2005, 12(123): 181 - 186.
- [2] 董天宝. 垃圾渗滤液处理过程中水溶性有机物特征研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012. (DONG Tianbao. Study on the characteristics of dissolved organic matter in leachate treatment process [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012.)
- [3] HE Ruo, TIAN Baohu, ZHANG Qiqi, et al. Effect of Fenton oxidation on biodegradability, biotoxicity and dissolved organic matter distribution of concentrated landfill leachate derived from a membrane process [J]. Waste management, 2015, 4(38): 232 - 239.
- [4] WU Yanyu, ZHOU Shaoqi, QIN Fanghui, et al. Removal of humic substances from landfill leachate by Fenton oxidation and coagulation [J]. Process safety and environmental protection, 2010, 88: 276 - 284.
- [5] MICHEL V, RUBEN V M, DORIAN P G, et al. Characterization and detoxification of a mature landfill leachate using a combined coagulation-flocculation/photo Fenton treatment [J]. Journal of hazardous materials, 2012, 29(205/206): 208 - 215.
- [6] 刘婷, 陈朱蕾, 唐素琴, 等. 不同填埋时间、不同填埋季节的垃圾渗滤液生物毒性 [J]. 环境科学, 2010, 31(2): 541 - 546. (LIU Ting, CHEN Zhulei, TANG Suqin, et al. Toxicity of leachate of different landfill ages and different seasons [J]. Environmental science, 2013, 31(2): 541 - 546.)
- [7] BORTOLOTO T, BERTOLDO J B, SILVEIRA F Z, et al. Evaluation of the toxic and genotoxic potential of landfill leachate using bioassays [J]. Environmental toxicology and pharmacology, 2009, 28: 288 - 293.
- [8] COTMAN M, GOTVAJN A Z. Comparison of different physico-chemical methods for the removal of toxicants from landfill leachate [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 178: 298 - 305.

- [9] BERNARD C, COLIN J R, ANNE L D D. Estimation of the hazard of landfill through toxicity testing of leachates [J]. *Chemosphere*, 1997, 35(11): 2783–2796.
- [10] 李广科, 赵由才. 垃圾填埋场渗滤液诱发小鼠骨髓细胞微核效应[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(1): 37–40.
(LI Guangke, ZHAO Youcai. Micronucleus effect induced by refuse landfill leachate in mouse bone marrow cell [J]. *China environment science*, 2004, 24(1): 37–40.)
- [11] 王跃华, 廖科伟, 白晓兰. 垃圾渗滤液的遗传毒性研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(2): 1–4.
(WANG Yuehua, LIAO Kewei, BAI Xiaolan. On the hereditary toxicity of the land filled refuse leachate [J]. *Journal of safety and environment*, 2007, 7(2): 1–4.)
- [12] 许静. 大型蚤急性毒性试验的优化与应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
(XU Jing. The optimization and research of *Daphnia magna* toxicity testing [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.)
- [13] WANG Can, HUANG Youkun, ZHAO Qing, et al. Treatment of secondary effluent using a three-dimensional electrode system: COD removal, biotoxicity assessment, and disinfection effects [J]. *Chemical engineering journal*, 2014, 243: 1–6.
- [14] 尹翠玲, 张秋丰, 刘洋, 等. 不同日龄卤虫对钻井液生物毒性效应比较研究[J]. *水产科学*, 2014, 33(6): 389–392.
(YIN Cuiling, ZHANG Qiufeng, LIU Yang, et al. The biological toxicity of various day old brine shrimp *artimia* saline to drilling effluent [J]. *Fisheries science*, 2014, 33(6): 389–392.)
- [15] SVENSSON B M, MATHIASSEN L, MARTEMSSON S, et al. *Artemia* salina as test organism for assessment of acute toxicity of leachate water from landfills [J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2005 (102): 309–321.
- [16] 刘国强. 垃圾渗滤液中 DOM 特征分析及去除性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
(LIU Guoqiang. Study on characteristic and removal efficiency of DOM in leachate [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.)
- [17] 陈婕. 卤虫无节幼体急性毒性实验方法的标准化研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2009.
(CHEN Jie. Study of standard methods of acute toxicity test of *Artemia nauplii* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2009.)
- [18] 中国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋石油勘探开发污染物生物毒性第二部分: 检测方法: GB/T 18420.2—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Biological toxicity for pollutants from marine petroleum exploration and exploitation-Part 2: Test method: GB/T 18420.2—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.)
- [19] SHAALA N M A, ZULKIFLI S Z, ISMAIL A, et al. Lethal concentration 50 (LC₅₀) and effects of Diuron on morphology of brine shrimp *artemia salina* (branchiopoda: anostraca) nauplii [J]. *Procedia environmental science*, 2015, 30(2): 279–284.
- [20] SIRDART A J, COCK I E. Effect of Aloe barbadensis Miller juice on oxidative stress biomarkers in aerobic cells using *artemia franciscana* as a model [J]. *Phytotherapy research*, 2010, 24(3): 360–364.
- [21] 张胜利. 基于垃圾渗滤液中有有机污染物特征的预处理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
(ZHANG Shengli. Study on pretreatment process based on the characteristics of pollutants in landfill leachate [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.)
- [22] SVENSSON B M, MATHIASSEN L, MARTEMSSON L, et al. *Artemia* salina as test organism for assessment of acute toxicity of leachate water from landfills [J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2005, 102(1): 309–321.
- [23] MAVAKALA B K, LE F S, MULAJI C K, et al. Leachates draining from controlled municipal solid waste landfill: detailed geochemical characterization and toxicity tests [J]. *Waste management*, 2016, 55: 238–248.
- [24] 张华, 曲久辉, 刘会娟. 氯化法和臭氧氧化预处理对污水中溶解性有机物发光细菌急性毒性的影响[J]. *中国科学(化学)*, 2011, 41(1): 91–96.
(ZHANG Hua, QU Jiuhui, LIU Huijuan. Effect of chlorination and ozone pre-oxidation on the photobacteria acute toxicity for dissolved organic matter from sewage treatment plants [J]. *Science China (chemistry)*, 2011, 41(1): 91–96.)