

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.015

# 垃圾焚烧厂渗滤液抗生素赋存特征与归趋分析

芮璇, 龚华波, 朱南文

(上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 分析了上海市某生活垃圾焚烧厂渗滤液处理系统中3类18种抗生素的赋存特征与归趋情况。结果表明,渗滤液原液中磺胺类(SAs)、喹诺酮类(FQs)和大环内酯类(MLs)抗生素的浓度分别为508.3~613.8、1 471~2 073、931~1 466 ng/L。渗滤液经厌氧—两级缺氧/好氧生化系统处理后,SAs、FQs、MLs三类抗生素的去除率分别为95.4%、60.9%、99.3%,生化处理可有效降解SAs和MLs抗生素,但对FQs抗生素的降解效果较差;FQs抗生素经污泥吸附后的去除率为7.6%~17.7%,SAs和MLs抗生素在污泥中的含量则都低于5%。污泥吸附在抗生素去除方面的占比较低,渗滤液中的抗生素主要通过生化处理被去除,微生物降解是抗生素在渗滤液处理过程中被去除的主要机制。

**关键词:** 垃圾焚烧厂; 渗滤液; 抗生素; 赋存特征

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0101-07

## Occurrence Characteristics and Fate of Antibiotics in Leachate from Waste Incineration Plants

RUI Xuan, GONG Hua-bo, ZHU Nan-wen

(School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This paper analyzed the occurrence characteristics and fate of 3 groups of 18 antibiotics in the leachate treatment system of a domestic waste incineration plant in Shanghai. The concentration ranges of sulfonamides (SAs), quinolones (FQs) and macrolides (MLs) in the original leachate were 508.3–613.8 ng/L, 1 471–2 073 ng/L and 931–1 466 ng/L, respectively. The removal rates of SAs, FQs and MLs antibiotics reached 95.4%, 60.9% and 99.3% respectively after the leachate was treated by anaerobic–two-stage anoxic/aerobic biochemical treatment system. The biochemical treatment could effectively degrade SAs and MLs antibiotics, but the degradation performance of FQs antibiotics was poor. The removal rates of FQs antibiotics by sludge adsorption was between 7.6% and 17.7%, while the contents of SAs and MLs antibiotics in the sludge were both lower than 5%. The percentage of sludge adsorption contributed to antibiotic removal was relatively low. Antibiotics in leachate were mainly removed by biochemical treatment, and microbial degradation was the main mechanism of antibiotic removal in leachate treatment.

**Key words:** waste incineration plant; leachate; antibiotics; occurrence characteristics

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA0910300)

通信作者: 朱南文 E-mail: nwzhu@sjtu.edu.cn

抗生素是常用的预防或治疗人类和动物疾病的药物,在医药、农业、水产养殖和畜牧业等领域应用广泛<sup>[1-2]</sup>。然而,由于抗生素治疗剂量不能被有效吸收,而会以排泄物的形式释放到环境中,加之以作物喷洒<sup>[3]</sup>、垃圾渗滤液携带<sup>[4]</sup>及制药废水排放<sup>[5]</sup>等方式进入环境中的抗生素量也在不断增加,导致抗生素对环境的影响与日俱增,同时由此引发了抗生素耐药细菌的出现、抗生素抗性基因的传播富集等问题<sup>[6]</sup>。当前,人们对环境介质中抗生素的关注更多在于水环境中抗生素浓度及其变化规律<sup>[7]</sup>,而对生活垃圾等方面的研究较少。事实上,垃圾中的抗生素会在潮湿环境下逐步释放,从而进入渗滤液中<sup>[8]</sup>,并达到较高的浓度水平<sup>[9]</sup>。渗滤液中携带的抗生素在经过常规污染控制系统处理后,残留部分会随着尾水排放,在环境中发生传播,进而带来较高的生态毒理学风险<sup>[10]</sup>。

近年来,关于垃圾渗滤液中抗生素的研究主要集中于城市生活垃圾填埋场渗滤液<sup>[11-12]</sup>,而鲜有对垃圾焚烧厂渗滤液中抗生素分布与去除的报道。因此笔者主要分析了上海市某垃圾焚烧厂渗滤液处理工艺中3类18种抗生素的浓度分布特征及降解归趋,以填补目前生活垃圾焚烧厂中抗生素相关研究的不足,旨在为焚烧厂渗滤液中抗生素的迁移转化、风险评估提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

实验所用垃圾渗滤液取自上海市某再生能源有限公司,该公司日焚烧处理生活垃圾1 000 t,年焚烧处理生活垃圾约 $33 \times 10^4$  t,渗滤液处理系统采用“调节池+厌氧反应器+MBR系统(两级A/O+外置式超滤膜)+纳滤系统(NF)”组合工艺,进水设计流量为300 m<sup>3</sup>/d。渗滤液处理流程如图1所示。

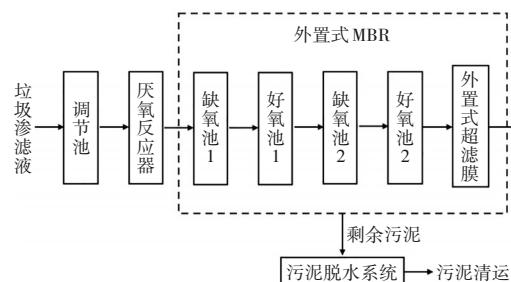


图1 垃圾焚烧厂渗滤液处理流程

Fig.1 Treatment process of leachate from waste incineration plant

2022年8月采集渗滤液处理工艺中原液(RAW)、厌氧池出水(IC)、好氧1池出水(O1)、好氧2池出水(O2)、超滤出水(UF)的水样和剩余污泥样品。渗滤液采集于各处理单元取水口,用聚乙烯瓶带回,取回的渗滤液与污泥样品均置于4℃环境下低温保存,并在48 h内对样品进行预处理。

### 1.2 垃圾渗滤液的主要水质特征

垃圾焚烧厂渗滤液中COD浓度可达60 000~75 000 mg/L,有机物浓度极高,成分复杂。BOD<sub>5</sub>/COD大于0.5,易生物降解的脂肪酸类物质是有机物的主要成分,渗滤液可生化性较高。TN浓度为1 200~3 500 mg/L, NH<sub>3</sub>-N浓度为1 000~2 500 mg/L。可见,渗滤液具有COD、TN和NH<sub>3</sub>-N浓度高的特点。其TP浓度较低,营养元素比例失调,在渗滤液生物处理过程中需要额外补充磷源。

### 1.3 实验试剂及设备

实验试剂包括甲醇(色谱纯)、盐酸(优级纯)、柠檬酸(≥99.5%)、乙二醇四乙酸二钠(≥99%)、磷酸氢二钠。18种抗生素标准品:磺胺喹恶啉(SQ)、磺胺二甲基嘧啶(SMT)、磺胺嘧啶(SDZ)、磺胺噻唑(STZ)、磺胺甲基嘧啶(SMR)、磺胺甲恶唑(SMX)、磺胺间甲氧嘧啶(SMM)、磺胺吡啶(SPD)、磺胺氯哒嗪(SCP)、磺胺二甲氧嘧啶(SDT)、诺氟沙星(NFX)、恩诺沙星(EFX)、环丙沙星(CFX)、氧氟沙星(OFX)、阿奇霉素(AZM)、去水红霉素(ETM-H<sub>2</sub>O)、克拉霉素(CLR)、罗红霉素(RTM)。用甲醇配制0.2、1、2、5、20、50、100、200、400、800 μg/L浓度梯度的抗生素混合标准液,并于-80℃的环境下保存备用。

实验设备主要包括全自动固相萃取仪、固相萃取小柱Oasis HLB、超高效液相色谱-三重四极杆质谱仪、冷冻干燥机、涡旋混匀仪、氮吹仪等。

### 1.4 样品预处理

渗滤液样品预处理:取200 mL渗滤液,采用0.45 μm滤膜过滤,投加0.2 g Na<sub>2</sub>EDTA,用盐酸调节水样pH为3。萃取前依次采用10 mL的甲醇、超纯水和盐酸(pH=3)对Oasis HLB固相萃取小柱进行活化。对处理后的样品进行固相萃取,流速为3 mL/min。样品萃取富集以后,用10 mL超纯水冲洗,然后真空抽滤30 min以确保水分被完全去除。采用10 mL甲醇溶液进行洗脱,流速为4 mL/min,洗脱液在40℃氮吹条件下浓缩至约0.5 mL,再用甲醇与水(1:1)定容至1 mL,注入样品瓶中,于-20℃环境下

保存待测。

污泥样品预处理:预先冷冻污泥样品12 h,放入真空冷冻干燥机中48 h,研磨并过200目筛。称取2 g冷冻干燥后的污泥样品,放入50 mL聚丙烯离心管中。加入甲醇和Na<sub>2</sub>EDTA-McIlvaine缓冲溶液各7.5 mL。涡旋混合1 min后,在功率为300 W下超声15 min破碎污泥样品,再涡旋混合1 min,在8 000 r/min下离心10 min后收集上清液,重复3次。混合3次的上清液,用超纯水稀释至500 mL,用盐酸调节pH至3,取200 mL进行固相萃取。固相萃取程序与渗滤液样品的相同。

1.5 抗生素检测条件

本实验采用UPLC-3Q-MS超高效液相色谱-三重四极杆质谱仪测定抗生素浓度。液相色谱条件:色谱柱为ACQUITY BEH C18柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm),柱温为40 ℃,流动相A为0.1%的甲酸水溶液,流动相B为乙腈溶液。质谱条件:电喷雾离子源(ESI),正离子模式;气帘气压强为35 psi(1 psi=6.895 kPa);离子化电压为5 500 V;去溶剂温度为500 ℃;雾化气压强为55 psi;辅助加热气压强为55 psi;采用多重反应监测(MRM)对样品进行分析。

2 结果与讨论

2.1 垃圾渗滤液主要污染物浓度及其去除效果

该垃圾焚烧厂渗滤液原液一年的COD、TN、NH<sub>3</sub>-N的变化情况如图2所示。

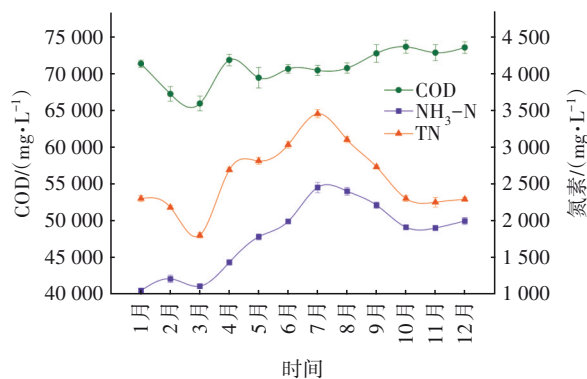


图2 渗滤液原液中主要污染物浓度的变化  
Fig.2 Change of main pollutants concentration in original leachate

从图2可以看出,COD浓度为65 900~73 600 mg/L,夏季和冬季的平均浓度相当,春季最低,约为69 033 mg/L,秋季最高,约为73 033 mg/L。一年中COD最低浓度出现在3月,最高浓度出现在10月。

其主要原因是上海地区夏、秋季的气温普遍高于春、冬季,高温能使微生物种类增多和活性增强,进而促进垃圾中有机物的释放,但是夏季相对于秋季降雨量大,这会对渗滤液有一定的稀释作用,故COD平均浓度在秋季达到最高值。TN浓度为1 780~3 460 mg/L,春、秋、冬季平均浓度相近,而夏季TN平均浓度高达3 193 mg/L,远高于其他季节。NH<sub>3</sub>-N浓度为1 040~2 440 mg/L,渗滤液中NH<sub>3</sub>-N是TN的重要组成部分,一年中其浓度的变化趋势也与TN相类似,夏季的平均浓度普遍高于其他季节。出现这种季节性差异的原因可能是渗滤液的NH<sub>3</sub>-N主要来源于垃圾中的蛋白质等含氮化合物的生物降解,而蛋白质的分解速率受温度影响较大,夏季高温有利于提高微生物活性,进而加速蛋白质中有机氮的释放,使得夏季渗滤液中NH<sub>3</sub>-N和TN浓度最高。

该垃圾焚烧厂渗滤液各处理单元出水水质见表1。可知,渗滤液原液的COD高达70 896 mg/L, NH<sub>3</sub>-N、TN浓度也分别达到1 791和2 558 mg/L,具有有机物浓度极高和氨氮浓度高的特点。渗滤液经调节池调节水质水量后进入厌氧反应器中,厌氧反应器能够去除绝大部分有机物,COD去除率高达84.6%,但对氮基本没有去除效果。随后垃圾渗滤液进入两级A/O单元和超滤单元,NH<sub>3</sub>-N和TN主要在两级A/O生化段被去除,去除率分别高达99.8%和95.4%。生化出水经超滤膜进行泥水分离,超滤出水中COD、NH<sub>3</sub>-N和TN浓度分别为691、1和102 mg/L,未达到规定的排放标准,需要进入纳滤系统进行进一步处理。纳滤出水中COD、NH<sub>3</sub>-N和TN浓度分别为158、0和48 mg/L,出水水质达到《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)。

表1 垃圾渗滤液处理系统各工艺单元出水水质  
Tab.1 Effluent quality of each process unit in leachate treatment system

项目	污染物平均浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )					总去除率/%
	渗滤液原液	厌氧出水	生化出水	超滤出水	纳滤出水	
COD	70 896±1 670	10 951±966	912±156	691±139	158±24	99.8
TN	2 558±414	2 691±379	117±17	102±15	48±7	98.1
NH <sub>3</sub> -N	1 791±433	2 173±424	4±1	1±0.5	0	100



## 2.2 渗滤液原液中抗生素的赋存特征

对渗滤液原液中3类18种抗生素进行测定,共检出13种,每种抗生素的浓度如图3所示。可知,3类抗生素的检出浓度排序为:FQs抗生素(1 471~2 073 ng/L)>MLs抗生素(931~1 466 ng/L)>SAs抗生素(508.3~613.8 ng/L)。抗生素的检出浓度低于上海市垃圾填埋场渗滤液<sup>[13]</sup>和上海城市生活垃圾中转站渗滤液中的浓度<sup>[14]</sup>,但远高于地下水和地表水中的抗生素检出浓度<sup>[15]</sup>。不同抗生素在渗滤液中所占的比例相差较大,其中FQs抗生素检出浓度占比为45.51%,检出浓度的排序为OFX>NFX>EFX>CFX。据上海地区社区卫生服务中心抗菌药物使用情况调查来看,喹诺酮类的左氧氟沙星类药物使用量连续三年排名第一<sup>[16]</sup>,这可能是OFX检出浓度高的原因。MLs抗生素浓度占比为37.22%,其中CLR浓度相对较高,AZM、RTM、ETM-H<sub>2</sub>O浓度相近。检测的10种SAs抗生素中有5种在渗滤液原液中被检出,检出率为50%,检出浓度占比为17.27%。其中,SMT检出浓度最高,平均浓度约为380 ng/L,SPD和SDZ检出浓度相对较高,STZ、SMR、SMX、SCP、SDT低于检出限。

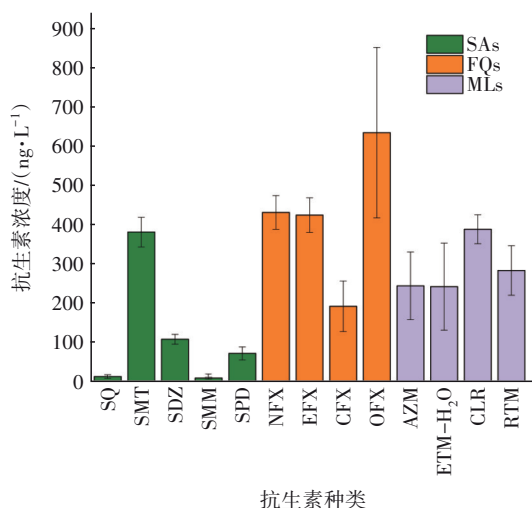


图3 渗滤液原液中抗生素浓度分布

Fig.3 Distribution of antibiotic concentrations in original leachate

## 2.3 生化—超滤系统对抗生素的去除效果

渗滤液处理系统中抗生素浓度的变化如图4所示。可知,渗滤液经过厌氧反应器处理后,SAs、FQs、MLs抗生素的去除率分别为10.6%、42.6%、63.8%;经一级A/O生化处理后,去除率分别为94.5%、62.8%、97.2%;经过两级A/O生化处理后,

去除率分别为95.4%、60.9%、99.3%;经超滤处理后,去除率分别达到96.5%、58.3%、99.6%。可见,SAs主要在一级A/O生化处理阶段被去除,而FQs和MLs在厌氧处理和一级A/O生化处理两个阶段都有明显去除。超滤出水中抗生素浓度与二级A/O生化处理出水基本无明显差异,因为小分子质量的抗生素能够透过超滤膜,难以被超滤截留去除<sup>[17]</sup>。经过垃圾渗滤液处理系统后,超滤出水中SAs和MLs浓度分别降至20.4和5.2 ng/L,基本被完全去除,但FQs在出水中的浓度仍高达637.3 ng/L。

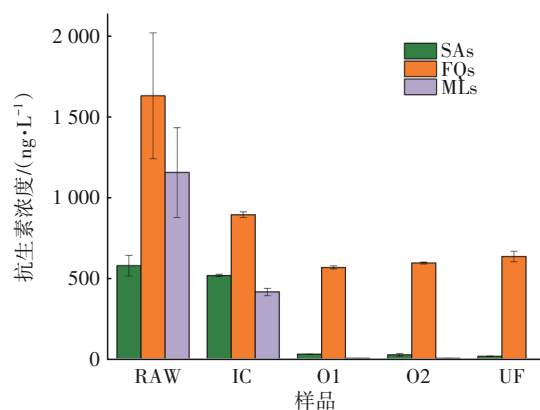


图4 渗滤液处理系统中抗生素浓度的变化

Fig.4 Change of antibiotics concentration in leachate treatment system

为了了解渗滤液不同处理阶段对各种抗生素的去除特征,列出了13种有检出的抗生素在不同处理单元出水中的浓度分布情况,结果如图5所示。可以看出,渗滤液处理系统对13种抗生素都有一定的去除效果。经过生化—超滤系统处理后,垃圾渗滤液中每种SAs抗生素在超滤出水中的浓度均小于10 ng/L,5种SAs抗生素的去除率均达到60%以上,其去除率顺序为:SMT(100%)>SDZ(92.4%)>SPD(90.6%)>SMM(83.9%)>SQ(67.3%)。SQ、SMT、SDZ在厌氧处理单元几乎没有被去除,而SMM和SPD在厌氧反应器中有一定的去除效果,去除率分别为36.1%、36.5%,SMT经过一级A/O生化处理后,去除率达到100%,SDZ、SMM和SPD也主要在一级A/O生化处理系统中被去除。渗滤液生化—超滤系统对4种FQs也有较好的去除效果,其去除顺序为:NFX(78.9%)>EFX(78.1%)>CFX(43.8%)>OFX(36.8%),其中CFX、NFX和EFX在MBR出水中的浓度均小于100 ng/L,而对OFX的去除效果不佳,超滤出水浓度仍高达400 ng/L;EFX主要在厌氧

阶段被去除,NFX和CFX在厌氧阶段几乎无降解,主要在两级A/O生化阶段被去除,OFX在最后出水中的浓度比生化出水浓度反而略有增加,可能是吸附在固相上的OFX又重新进入水中导致的。对于MLs抗生素,AZM、CLR和RTM主要在厌氧阶段被去除,去除率分别为82.8%、83.8%和71.1%。而ETM-H<sub>2</sub>O经厌氧反应器处理后的去除率为15.1%,其主要在两级A/O生化单元被去除,经过生化处理后去除率达到97.2%,最终在超滤出水中的浓度为5.2 ng/L,基本被完全降解。

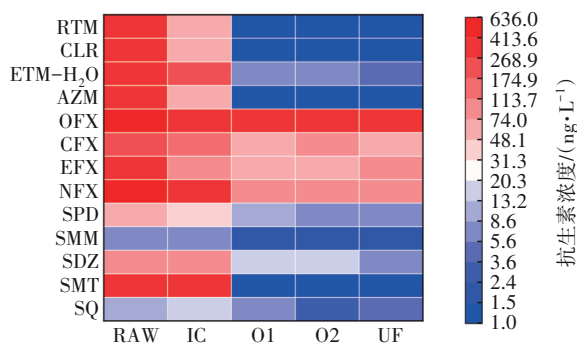


图5 垃圾渗滤液处理系统中各类抗生素浓度分布

Fig.5 Distribution of antibiotic concentrations in leachate treatment system

2.4 生化—超滤系统中抗生素归趋分析

在垃圾渗滤液处理过程中,抗生素一方面通过生化过程被去除;另一方面,可通过污泥吸附途径离开处理系统。各处理单元的抗生素量可以通过以下公式计算:

$$m_w = Q_w \times C_w \quad (1)$$

$$m_s = Q_s \times C_s \quad (2)$$

式中: $m_w$ 和 $m_s$ 分别为抗生素在污水和污泥中的质量流量,ng/d; $Q_w$ 为污水的流量,L/d; $Q_s$ 为污泥的流量,g/d; $C_w$ 为抗生素在污水中的浓度,ng/L; $C_s$ 为抗生素在污泥中的浓度,ng/g。

抗生素在渗滤液处理过程中主要通过污泥吸附和生物降解作用被去除,其质量平衡见式(3)。

$$m_{in} = m_{out} + m_{bio} + m_{sor} \quad (3)$$

式中: $m_{in}$ 和 $m_{out}$ 分别为原水和超滤出水中抗生素的质量流量,mg/d; $m_{bio}$ 为被生物降解的抗生素质量流量,mg/d; $m_{sor}$ 为被污泥吸附去除的抗生素质量流量,mg/d。 $m_{in}$ 、 $m_{out}$ 和 $m_{sor}$ 由实验测得数据经式(1)、(2)计算而得, $m_{bio}$ 由式(3)计算得到。

为了解整个渗滤液处理工艺中各类抗生素的

分布情况,对其进行质量平衡计算和分析,结果见表2。FQs抗生素的检出浓度占污泥总体检出浓度的96.3%,NFX、EFX、CFX和OFX均有检出,其中OFX检出浓度最高,平均检出浓度为38.5 ng/g,NFX、EFX、CFX的平均检出浓度也基本在5 ng/g以上。而SAs抗生素中只有SDZ被检出,平均检出浓度为1.5 ng/g;MLs抗生素只有ETM-H<sub>2</sub>O被检出,平均检出浓度为0.9 ng/g;两者检出之和的浓度占比不足5%。奚慧等<sup>[13]</sup>在对垃圾填埋场固体废弃物中5类抗生素浓度分布的研究中发现,FQs抗生素的检出浓度占总体浓度的91.1%,这与本实验污泥中检出的FQs抗生素浓度占比相似。FQs抗生素在污泥中的检出浓度较高,可能与FQs抗生素使用量大有关;另一方面也与其分子结构有关,FQs抗生素分子结构中含有带正电荷的氮原子或二甲氨基组,由于静电引力的作用,容易被带负电荷的污泥吸附。SAs和MLs抗生素在污泥中的检出浓度较低,可能是因为SAs和MLs抗生素属于高亲水化合物,难以通过疏水作用从水相转移到泥相。

表2 抗生素在污水和污泥中的质量分布

Tab.2 Mass distribution of antibiotics in sewage and sludge

抗生素	抗生素质量流量/(mg·d <sup>-1</sup> )			去除率/%		
	原液	MBR出水	剩余污泥	总去除率	污泥吸附	生物降解
SQ	3.7±1.4	1.2±0.3	nd	67.3		67.3
SMT	114.2±11.4	nd	nd	100		100
SDZ	32.2±3.8	2.4±0.6	1.4±0.5	92.4	4.3	88.1
SMM	3±0.8	0.5±0.1	nd	83.9		83.9
SPD	21.4±5	2±0.2	nd	90.6		90.6
NFX	116.4±18.2	24.6±6.5	9.4±1.1	78.9	8.1	70.8
EFX	114±18.7	25±1.4	8.7±0.6	78.1	7.6	70.5
CFX	38.1±27.4	21.4±2.5	4.6±0.5	43.8	12	31.8
OFX	190±65.2	120.3±12.5	33.7±2.3	36.8	17.7	19.1
AZM	86±26	nd	nd	100		100
ETM-H <sub>2</sub> O	88±33.4	1.6±0.1	0.8±0.2	98.2	0.9	97.3
CLR	110±11	nd	nd	100		100
RTM	63±19	nd	nd	100		100

注: nd表示未检出。

FQs 抗生素经污泥吸附去除的比例为 7.6%~17.7%, 污泥吸附去除率最高的 OFX 也仅为 17.7%; SAs 和 MLs 抗生素在污泥中的比例均小于 5%; SAs 和 MLs 抗生素生物降解的比例为 67.3%~100% 和 97.3%~100%, 说明抗生素主要通过生物降解作用被去除, 污泥吸附去除的抗生素占比很小。抗生素的微生物降解机制主要是共代谢效应和混合基质生长两种作用<sup>[18]</sup>, 共代谢效应主要是系统在生化处理过程中产生非特异性分解酶将抗生素分解为中间产物; 混合基质生长作用则可以实现抗生素的矿化, 两者均可以降低系统中的抗生素浓度<sup>[19-20]</sup>。每一类抗生素在渗滤液处理过程中的去除规律类似, 这是由于不同种类抗生素的化学结构和理化性质的差异巨大, 使得它们在水相和固相中表现出的吸附行为和能各不相同, 有机化学物质在水相和固相之间的吸附能力由吸附系数  $K_d$  表示,  $K_d = C_s / C_w$ ,  $C_s$  和  $C_w$  分别表示吸附平衡时化合物在吸附相 (mg/kg) 和水相 (mg/L) 中的浓度。有研究表明<sup>[21]</sup>, FQs、SAs 和 MLs 抗生素的  $K_d$  分别为 260~5 610、4.2~6.8、7~134 L/kg, 这可能是导致 3 类抗生素在剩余污泥中检出浓度有明显差异的原因。

### 3 结论

① 渗滤液中抗生素含量较高。18 种目标抗生素里有 13 种在垃圾焚烧厂渗滤液原液中被检出, FQs、MLs 和 SAs 抗生素检出的浓度范围分别为 1 471~2 073、931~1 466、508.3~613.8 ng/L, 其中检出浓度最高的抗生素是 OFX, 抗生素检出浓度远高于地下水和地表水中的抗生素检出浓度。有 6 种抗生素在污泥里被检出, FQs 抗生素的检出浓度占污泥总体检出浓度的 96.3%, 其中 OFX 检出浓度最高, 平均检出浓度为 38.5 ng/g。

② 渗滤液处理系统对 13 种抗生素都有一定的去除效果。渗滤液经厌氧—两级缺氧/好氧生化系统处理后, SAs、FQs、MLs 三类抗生素的去除率分别可达到 95.4%、60.9%、99.3%, 超滤处理后 SAs、FQs、MLs 的去除率分别达到 96.5%、58.3%、99.6%。EFX、AZM、CLR 和 RTM 主要在厌氧单元被去除, 其余抗生素多在两级 A/O 生化处理单元被去除。

③ 微生物降解是抗生素在渗滤液处理过程中得以去除的主要机制, 而污泥吸附对抗生素的去

除作用较小。3 类目标抗生素中, SAs、FQs 和 MLs 抗生素通过微生物降解处理的去除率分别为 67.3%~100%、19.1%~70.8% 和 97.3%~100%。FQs 抗生素经污泥吸附的去除率为 7.6%~17.7%, SAs 和 MLs 抗生素在污泥中的比例均小于 5%。

### 参考文献:

- [1] QIAO M, YING G G, SINGER A C, *et al.* Review of antibiotic resistance in China and its environment [J]. *Environment International*, 2018, 110: 160-172.
- [2] CHEN J, YING G G, DENG W J. Antibiotic residues in food: extraction, analysis, and human health concerns [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(27): 7569-7586.
- [3] MCMANUS P S. Does a drop in the bucket make a splash? Assessing the impact of antibiotic use on plants [J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2014, 19: 76-82.
- [4] CHUNG S S, ZHENG J S, BURKET S R, *et al.* Select antibiotics in leachate from closed and active landfills exceed thresholds for antibiotic resistance development [J]. *Environment International*, 2018, 115: 89-96.
- [5] TAHRANI L, VAN LOCO J, BEN M H, *et al.* Occurrence of antibiotics in pharmaceutical industrial wastewater, wastewater treatment plant and sea waters in Tunisia [J]. *Journal of Water and Health*, 2016, 14(2): 208-213.
- [6] 黄福义, 李虎, 安新丽, 等. 城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 [J]. *环境科学*, 2016, 37(10): 3949-3954.  
HUANG Fuyi, LI Hu, AN Xinli, *et al.* Comparative investigation of antibiotic resistance genes between wastewater and landfill leachate [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3949-3954 (in Chinese).
- [7] WANG J L, CHU L B, WOJNAROVITS L, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: an overview [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140997.
- [8] LIU H Y, LI H, QIU L B, *et al.* The panorama of antibiotics and the related antibiotic resistance genes (ARGs) in landfill leachate [J]. *Waste Management*, 2022, 144: 19-28.
- [9] FANG C R, CHEN B H, ZHUANG H F, *et al.*

- Antibiotics in leachates from landfills in northern Zhejiang Province, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 105(1): 36–40.
- [10] WANG K, REGUYAL F, ZHUANG T. Risk assessment and investigation of landfill leachate as a source of emerging organic contaminants to the surrounding environment: a case study of the largest landfill in Jinan City, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(15): 18368–18381.
- [11] 刘希. 城市生活垃圾填埋场垃圾渗滤液中抗生素与抗性基因的污染特征研究[D]. 重庆:中国科学院大学(重庆绿色智能技术研究院), 2018: 33–50.
- LIU Xi. Occurrence and Distribution of Antibiotics Antibiotic Resistance Genes in Landfill Leachate [D]. Chongqing: University of Chinese Academy of Sciences (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology), 2018: 33–50(in Chinese).
- [12] 孙金昭. 城市生活垃圾填埋场中抗生素残留浓度征及抗性基因相关性研究[D]. 上海:华东师范大学, 2017: 23–36.
- SUN Jinzhao. Characteristics of Antibiotics Contents in Municipal Solid Waste Landfills and Correlation with Antibiotic Resistance Genes [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017: 23–36 (in Chinese).
- [13] 奚慧, 孙金昭, 谢冰. 城市生活垃圾填埋场中抗生素残留特征研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1): 300–309.
- XI Hui, SUN Jinzhao, XIE Bing. The study of characteristics of antibiotic residues in municipal solid waste landfill [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 300–309(in Chinese).
- [14] WU D, HUANG Z T, YANG K, *et al.* Relationships between antibiotics and antibiotic resistance gene levels in municipal solid waste leachates in Shanghai, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(7): 4122–4128.
- [15] HUANG F Y, AN Z Y, MORAN M J, *et al.* Recognition of typical antibiotic residues in environmental media related to groundwater in China (2009–2019) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 399(15): 122813.
- [16] 李锦. 全国抗菌药物临床应用专项整治活动开展以来上海市社区医院使用情况调查[J]. *中国卫生标准管理*, 2016, 7(5): 122–125.
- LI Jin. Clinical application of antibacterial drugs in Shanghai since the rectification campaign community hospital usage survey [J]. *China Health Standard Management*, 2016, 7(5): 122–125 (in Chinese).
- [17] 王奇梁. 水中颗粒物对超滤过程中抗生素减量的影响[D]. 杭州:浙江科技学院, 2017: 34–38.
- WANG Qiliang. Effects of Particulates on Reduction of Antibiotics during Ultrafiltration Membrane Treatment [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science & Technology, 2017: 34–38 (in Chinese).
- [18] 张翔宇, 李茹莹, 季民. 污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5276–5288.
- ZHANG Xiangyu, LI Ruying, JI Min. Mechanisms and influencing factors of antibiotic removal in sewage biological treatment [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5276–5288 (in Chinese).
- [19] 崔迪, 邓红娜, 庞长洸, 等. 生物法去除水环境中磺胺甲恶唑的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(24): 32–38.
- CUI Di, DENG Hongna, PANG Changlong, *et al.* Progress in the study of the removal of sulfamethoxazole by biological methods in water environment [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(24): 32–38 (in Chinese).
- [20] 黄晓霞, 邱兆富, 曹国民, 等. 改良型SBR工艺对奶牛场废水中抗生素的去除效果[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 9–15.
- HUANG Xiaoxia, QIU Zhaofu, CAO Guomin, *et al.* Removal of antibiotics from dairy farm wastewater by modified SBR process [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 9–15(in Chinese).
- [21] WANG S L, WANG H. Adsorption behavior of antibiotic in soil environment: a critical review [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, 9(4): 565–574.

作者简介: 芮璇(1999–), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向为垃圾渗滤液处理技术。

E-mail: ruixuan16@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2022–10–09

修回日期: 2023–01–31

(编辑: 任莹莹)