

## 污水厂污泥卤素含量及水解酸化对总溴的影响

何品晶<sup>1,2</sup>, 庞 蕾<sup>1,2</sup>, 余光辉<sup>1,2</sup>, 邵立明<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 运用高温燃烧与离子色谱联用技术, 分析了8个污水处理厂污泥中的总氯和总溴含量, 并研究水解酸化工艺对污泥中总溴的降解规律. 结果表明, 污水处理厂污泥中的总氯质量分数(0.63~3.60 mg·g<sup>-1</sup>)比总溴质量分数(0.04~0.20 mg·g<sup>-1</sup>)约高1个数量级; 同时, 总氯质量分数比文献报道的有机氯质量分数(0.08~6.90 mg·g<sup>-1</sup>)高约2~4个数量级. 与pH为5.5相比, pH为10.0条件下的水解酸化过程对污泥的总溴有明显的降解效果, 但不能确定高温水解酸化是否能比低温水解酸化降解更多的总溴. pH为10.0的水解酸化工艺可以减少污泥处置(如土地利用、焚烧)中的总溴风险; 但是, 也可能增加该工艺产生的挥发性脂肪酸(VFA)用于补充生物除磷脱氮碳源时的风险.

**关键词:** 自动快速燃烧炉; 离子色谱; 总氯; 总溴; 水解酸化; 污水厂污泥

中图分类号: X 708

文献标识码: A

### Total Chlorides and Bromines in Sewage Sludge and Variation of Total Bromines in Hydrolysis and Acidification Processes

HE Pinjing<sup>1,2</sup>, PANG Lei<sup>1,2</sup>, YU Guanghui<sup>1,2</sup>, SHAO Liming<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The combined method of automatic quick furnace and ion chromatography was applied to investigating total chlorides and bromines in sewage sludge from eight wastewater treatment plants as well as total bromines in the degraded samples collected from hydrolysis and acidification processes. The results show that the content of total chlorides (0.63~3.6 mg·g<sup>-1</sup>) in sewage sludge is about one order of magnitude higher than that of total bromines (0.04~0.20 mg·g<sup>-1</sup>). Meanwhile, the content of total chlorides in this

study is 2~4 orders of magnitude higher than that of organic chlorides in literature (0.08~6.9 mg·g<sup>-1</sup>). As for the hydrolysis and acidification processes, total bromines of sludge flocs are significantly degraded at pH 10.0 when compared with pH 5.5. However, the superiority of thermophilic condition on the degradation of total bromines of sludge flocs is uncertain when compared with mesophilic condition. This study reveals for the first time that the hydrolysis and acidification processes at pH 10.0 could reduce the total bromines of sludge flocs and thereby reduce the risk of sludge disposal (i. e., land application, incineration). However, the volatile fatty acids (VFA) produced in the fermentation process at pH 10.0 may increase the risk as the carbon sources of tertiary treatment in WWTP, owing to the total bromines transferring from the solid state to the liquid state.

**Key words:** automatic quick furnace, ion chromatography; total chlorides; total bromines; hydrolysis and acidification; sewage sludge

污泥是城市污水处理厂的主要二次污染物, 其年产生量大, 并且仍以较快速率增长<sup>[1]</sup>. 目前, 城市污水厂污泥的主要处理途径有焚烧、土地利用和填埋等<sup>[2]</sup>. 由于污泥富集了所处理污水中含有的多种有毒有害物质, 二次污染控制就成为污泥处理处置和再利用的关键问题<sup>[3-4]</sup>.

有研究发现, 污泥中的有机污染物包含多环芳烃(PAHs)、邻苯二甲酸酯类(PAEs)、多氯代二苯并二恶英/呋喃(PCDD/Fs)、多氯联苯(PCBs)、氯苯(CBs)、氯酚(CPs)以及卤代烃等<sup>[2]</sup>. 这些有机物可能来源于焦化、冶炼、油漆、造纸、日用杀虫剂、杀菌剂等. 而含卤有机物在生产和使用后, 最终也会通过各种途径进入污水生物处理系统、自然或人工水体<sup>[5]</sup>. 有机氯化物一般具有较低的水溶性和高的辛醇—

收稿日期: 2009-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20977066); 国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目(2008ZX07317-003); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802470029)

作者简介: 何品晶(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为固体废物处理与资源化技术.

E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

水体系分配系数,这使得有机氯化物能够通过食物链的富集在动物体内累积,给人类健康带来巨大的隐患<sup>[6]</sup>.而有机溴化合物常作为阻燃剂和增塑剂使用,也会进入污水处理系统.

目前,有机卤素总量的分析方法主要有中子活化分析、微库仑滴定和毛细管电泳等<sup>[7]</sup>,Scholer等<sup>[8]</sup>也曾运用气相色谱分析有机卤素的含量.目前,已有可萃取有机卤素化合物(EOX)<sup>[9-10]</sup>、可吸附有机卤素化合物(AOX)<sup>[11]</sup>等定量指标,来描述总有机卤素化合物的污染状况.而通过吸附方法测定的有机卤素总量,得到的是可被活性炭吸附的结合在有机化合物中的卤族元素的总量,是总有机卤化物的一部分<sup>[10,12]</sup>.因此,无论是可萃取部分还是可吸附部分,都只能反映样品中所含的部分污染量,而无法了解其总量.Müller也曾指出,样品中的AOX含量与样品的环境危害之间并无较大关联<sup>[13]</sup>.分析方法上的欠缺,使得污泥中总卤素的污染状况尚不清楚.

水解酸化(厌氧消化)作为一种目前污水处理厂处理剩余污泥的常用方法,已经被证明对污泥中的有机质、多氯联苯类、PAEs类物质、氯酚类物质有降解作用<sup>[14-15]</sup>;同时,水解酸化工艺条件(如温度和

pH值)也会影响有机物的降解<sup>[15]</sup>.高温燃烧与离子色谱联用技术<sup>[16]</sup>能够测定各卤素的总量,但目前国内还鲜见有关将其应用到测定污泥中总氯和总溴含量的报道.本研究拟运用高温燃烧与离子色谱联用技术,考察不同污水处理厂污泥中总氯和总溴含量的差异,并研究不同水解酸化工艺条件下污泥中总溴的变化,探索温度和pH值变化对水解酸化过程中总溴的影响规律.

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥样品与水解酸化方法

在2006年5月到7月期间,取上海市8个污水处理厂曝气池的污泥用于总氯和总溴的测定.各污水处理厂的基本信息和污泥性质如表1所示.表中数据为3次试验测定结果的平均值,误差<10%.

选用上海曲阳污水处理厂曝气池的污泥用于水解酸化研究.污泥取回后先静置2h,撇除上清液,然后过1.2mm筛.过筛后污泥置于4℃冰箱保存备用,其性质见表2.

表1 各污水厂基本信息和污泥基本性质(以干基计)

Tab.1 Characteristics of wastewater treatment plants and sewage sludges (dry basis)

污水处理 厂名称	处理规模/ (t·d <sup>-1</sup> )	处理工艺	工业废水所 占比例/%	挥发分质量 分数/%	灰分质量 分数/%	含水率/%	碳质量 分数/%	氮质量 分数/%
曲阳	7.5	A <sup>2</sup> O <sup>1)</sup>	7	61.6	22.6	84.0	38.2	6.06
白龙港	120.0	一级强化法	30	47.6	43.6	73.0	23.5	2.86
闵行	3.2	A/O <sup>2)</sup>	15	59.8	29.8	87.3	36.8	5.21
松江老	7.0	活性污泥	40	51.7	33.9	80.2	31.6	5.71
松江东	4.2	MBR <sup>3)</sup>	70	46.4	46.1	69.9	29.5	6.60
松江西	4.2	A <sup>2</sup> O <sup>4)</sup>	60	20.1	79.6	73.4	8.60	4.30
曹阳	3.0	活性污泥	0	64.2	23.5	79.0	42.2	5.89
石洞口	40.0	SBR	40	57.5	31.3	71.1	29.9	5.83

1)A<sup>2</sup>O—两段缺氧/好氧工艺;2)A/O—缺氧/好氧工艺;3)MBR—膜生物反应器;4)SBR—序批式生物反应器.

表2 水解酸化所用污泥的基本性质

Tab.2 Characteristics of sewage sludge applied to hydrolysis and acidification process

工艺	$\rho_{\text{COD}}/$ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho_{\text{SCOD}}/$ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho_{\text{TSS}}/$ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho_{\text{VSS}}/$ (mg·L <sup>-1</sup> )	电导率/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	蛋白质/ (mg·g <sup>-1</sup> )	多糖/ (mg·g <sup>-1</sup> )	pH值
中温(37℃)	17 000±624	140±36	10.2	9.67	10.9	599±24	12.7±0.3	6.8
高温(55℃)	18 000±100	438±112	15.7	14.6	12.6	499±4	10.5±0.2	7.0

注:COD—化学需氧量;SCOD—溶解性化学需氧量;TSS—总悬浮物;VSS—挥发性悬浮物;蛋白质和多糖质量分数基准为挥发性悬浮物质量.

备用污泥取出混匀,然后用2mol·L<sup>-1</sup>HCl或2mol·L<sup>-1</sup>NaOH调节pH值至5.5或10.0,分别取1L置于1.5L密闭反应器中.反应开始时,先用氮气吹脱60s,以驱赶反应器内剩余的空气,然后把反应装置置于37℃或55℃恒温水浴锅中.反应器中的

污泥采用循环泵混匀.水解酸化过程中,反应器的pH值采用pH自动控制仪(pH101,HOTEC,台湾)自动控制.该自动控制仪用上述浓度的HCl或NaOH溶液调节反应器的pH值,使之维持在5.5或10.0.反应器每隔一段时间取样.

定时取样后,样品以  $2\ 500\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  转速离心 10 min,沉积物置于  $70\ ^\circ\text{C}$  烘干,磨碎后过 200 目筛,待用.

## 1.2 高温燃烧与离子色谱联用技术

### 1.2.1 原理

采用三菱公司的自动快速燃烧炉(AQF-100)、气体吸收装置(GA-100)和离子色谱(IC)联用.其原理为:将样品送入燃烧炉进行高达  $800\sim 1\ 100\ ^\circ\text{C}$  的燃烧,含硫和卤素的样品被  $\text{O}_2$  氧化,并由  $\text{Ar}_2$  携带进入吸收池吸收,硫元素最终被转化成  $\text{SO}_4^{2-}$ ,卤素(X)首先生成 HX 或  $\text{X}_2$  气体,然后在吸收池内被转化成  $\text{X}^-$ ;吸收池的样品进入离子色谱进行分析.在吸收溶液中添加标准物质  $\text{PO}_4^{3-}$ ,校正样品测定结果.

### 1.2.2 仪器与试剂

离子色谱系统:ICS-90 型离子色谱仪(美国戴安公司),Chromleon 色谱工作站,AMMS III 型化学再生抑制器.

高温燃烧系统:Mitsubishi AQF-100 型自动快

速燃烧炉,由自动进样器装置 ABC、自动快速燃烧炉 AQF 和气体吸收装置 GA-100 组成.

氯标准品和硫标准品购自北京石油化工科学研究院分析仪器开发中心;溴标准品采用十六烷基三甲基溴化铵;吸收液所用的磷酸根标准溶液储备液,均购自国家标准物质研究中心;所有用水均为 Millipore 纯水.

### 1.2.3 分析条件

离子色谱系统:分离柱,Dionex IonPac AS 14A 分离柱和 IonPac AG14A 保护柱, $8.0\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $1.0\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NaHCO}_3$  等度淋洗,外接硫酸化学抑制,流速为  $1.0\ \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,分析时间为 16.5 min.

高温燃烧系统:氧气流速为  $400\ \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,氦气流速为  $200\ \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ;进口温度为  $800\ ^\circ\text{C}$ ,出口温度为  $900\ ^\circ\text{C}$ ;在燃烧炉内分成 3 段燃烧,燃烧程序见表 3;吸收液体积为 5 mL;所连接的离子色谱进样体积为  $100\ \mu\text{L}$ .

表 3 AQF 燃烧分析程序

Tab.3 Procedure of AQF combustion

入口段		中段		最里段		最终位置 燃烧时间/s	冷却时间/s	进样速度 /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
长度/mm	时间/s	长度/mm	时间/s	长度/mm	时间/s			
100	120	115	120	130	120	100	60	10

### 1.2.4 收率实验

在石英舟上注射  $50\ \mu\text{L}$  标准品( $20\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),采用同样方法进行燃烧、吸收和离子色谱分析,所得回收率结果在  $96\%\sim 102\%$ .

### 1.2.5 燃烧分析程序

固体样品使用陶瓷舟进样.所有的陶瓷舟在使用之前都进行了 2 次预热,以去除陶瓷舟内可能残留的有机物.称取样品约 10 mg,置于陶瓷舟上,根据表 3 所示的程序进行燃烧.燃烧炉内温度固定,位置 1,2,3 代表了燃烧炉的入口段、中段和最里段.

## 1.3 分析方法

蛋白质测定采用 Lowry 法<sup>[17]</sup>;多糖测定采用 Anthrone 法<sup>[18]</sup>;pH 值和电导率测定采用 PHS-2F 数字 pH 计和 DDSJ-308A 电导率计(上海精密科学仪器有限公司);样品通过中速定性滤纸后,得到滤液的 COD 值为 SCOD,SCOD 和 COD 采用 HACH 公司仪器测定(HACH DR/2000,HACH 公司);碳和氮测定采用元素分析仪(Vario EL III,德国);TSS、VSS、挥发分、灰分和含水率测定采用 US EPA 方法<sup>[19]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同污水处理厂污泥中总氯和总溴含量

本研究所得到的总氯或总溴含量定义为污泥样品(干基)中总氯的质量与污泥样品质量的比值.不同污水处理厂污泥中总氯和总溴质量分数的统计结果,如图 1 所示.可以看出,不同污水处理厂污泥中总氯和总溴质量分数平均值分别为  $1.65$  和  $0.09\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , $25\%\sim 75\%$  的总氯和总溴分布在约  $0.8\sim 2.0\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.05\sim 0.10\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  的范围内.因此,尽管污水处理厂处理规模和工艺相差较大,且污泥基本性质也不尽相同(表 1),但不同污泥样品间的总氯与总溴含量相差并不是很大.然而,同一个污泥样品中的总氯和总溴质量分数却相差 1 个数量级以上,表明两者有显著差异.

Stevens 等<sup>[20]</sup>曾经检测过英国某几个污水处理厂污泥中的多氯联苯(PCBs)含量,发现总 PCBs 的质量分数范围是  $0.11\sim 0.44\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .Cai 等<sup>[21]</sup>利用 GC-MS 技术对中国不同城市的 11 个污水处理厂污泥进行了研究,检测到污泥中氯苯(CBs)总质量分

数最高达  $6.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 方展强等<sup>[22]</sup>对珠江三角洲周围的人海口沉积滩的贝壳进行了研究, PCBs 质量分数范围在  $0.09 \sim 0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 而在本研究中, 利用高温燃烧和离子色谱联用技术所测到的污泥样品中的总氯质量分数, 比文献结果要高 2~4 个数量级(表 4). 这表明 PCBs, CBs 等目前被广泛关注的几类含氯有机物, 实际上只构成总氯的很少一部分. 污泥中还应存在其他多种含氯有机物, 其潜在的环境危害不容忽视. 但是, 限于现有的检测条件, 尚无法将其一一确定. 虽然本论文的实验材料与表 4 中其他文献的不同, 但由于本研究结果比文献高 2~4 个数量级, 足以说明与分析测试方法相比, 实验材料并不是造成差异的主要因素.

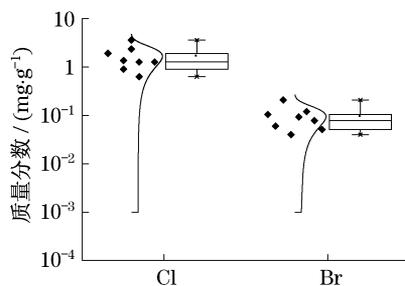


图 1 不同污水处理厂污泥中总氯和总溴质量分数的方框统计图

Fig.1 Box chart of total chlorides and total bromines in sewage sludges from different wastewater treatment plants

表 4 本研究结果与文献数据比较

Tab.4 Comparisons between this study and literatures

方法	检测方法	测定指标	质量分数/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )
文献[20]	气相色谱	总 PCBs	0.11~0.44
文献[21]	GC-MS	CBs	6.90
文献[22]	气相色谱	PCBs	0.08~0.60
本研究结果	高温燃烧离子色谱	总氯	0.63~3.60

## 2.2 不同水解酸化工艺中总溴与有机质的降解

本研究中, 水解酸化工艺的 pH 值通过  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$  或  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$  调节. 由于水解酸化过程中总氯含量会受该 pH 调节的影响, 因此, 本研究仅考察了污泥中总溴与有机质的降解规律.

图 2 所示为 pH 值为 5.5 和 10.0 的 2 种污泥中, 总溴质量分数在高温和中温水解酸化条件下随时间的变化曲线. 可以看出, 原污泥中总溴质量分数约为  $0.07 \sim 0.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . 在污泥水解酸化过程中, 高温条件下, 水解酸化 24 h, pH 值为 5.5 的污泥中

总溴质量分数上升至  $0.17 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  左右, 而 pH 值为 10.0 的污泥中总溴质量分数基本不变; 而后直至 120 h 时均变化较少; 且 pH 值为 5.5 的污泥中总溴质量分数总是高于 pH 值为 10.0. 而中温条件下, 在水解酸化的最初阶段(24 h), pH 值为 5.5 的污泥中总溴质量分数先下降至  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 然后, 再呈现先上升后下降的趋势; 而在 pH 值为 10.0 条件下, 总溴含量则呈下降的趋势. 污泥水解酸化 37 h 后, pH 值为 5.5 的污泥中总溴含量均高于原污泥中总溴含量; 而 pH 值为 10.0 的污泥中总溴含量则均低于原污泥中的总溴含量.

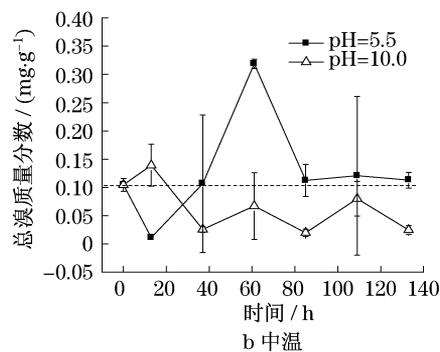
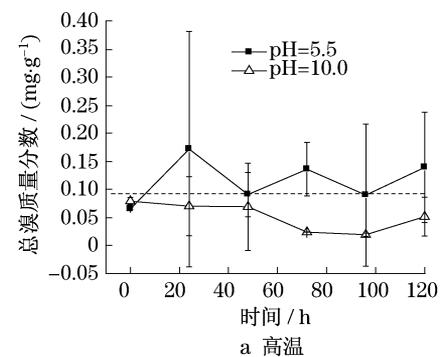


图 2 总溴质量分数随水解酸化时间变化曲线

Fig.2 Total bromines during hydrolysis and acidification with time

因此, 对于高温水解酸化工艺, 在 pH 值为 5.5 条件下, 污泥中总溴含量均高于原污泥; 而在 pH 值为 10.0 条件下, 污泥中总溴含量均高于原污泥; 同时, 在 120 h 的水解酸化过程中, pH 值为 5.5 条件下污泥的总溴含量均高于 pH 值为 10.0 条件. 对于中温水解酸化工艺, 在水解 37 h 前, pH 值为 5.5 条件下污泥中的总溴含量低于 pH 值为 10.0; 水解 37 h 后, pH 值为 5.5 条件下污泥中的总溴含量高于 pH 值为 10.0. 在图 2 中, 还可以明显地观察到, 在相同的温度(37 °C 或 55 °C)下, 污泥中的总溴含量在碱性条件下基本低于酸性条件; 在相同的 pH 值(5.5 或 10.0)下, 污泥中总溴含量在高温条件下高于中温

条件.

污泥中总溴含量的变化规律与有机质的变化规律相关.有机质的降解可用污泥中的 C 和 N 含量变化表征.由图 3 可知,在相同的温度或 pH 值下,污泥在碱性或高温条件下降解的有机组分更多.该结果与文献中化学分析方法测定的蛋白质和多糖的变化趋势相似<sup>[23-24]</sup>.Shao 等<sup>[25]</sup>和 Yu 等<sup>[26]</sup>也研究了水解酸化过程中有机质(主要是蛋白质和多糖)的降解趋势.结果表明,在水解酸化工艺(包括 pH 值为 5.5 和 10.0)中,一部分有机物降解的同时,也伴随着另一部分有机物从固相转移到液相,但 pH 值为 10.0 工艺中有机物的变化(降解加转化)趋势更明显.据此可推测,pH 值为 10.0 的水解酸化工艺污泥中总溴含量的减少可能是有机物降解和转移共同引起的.

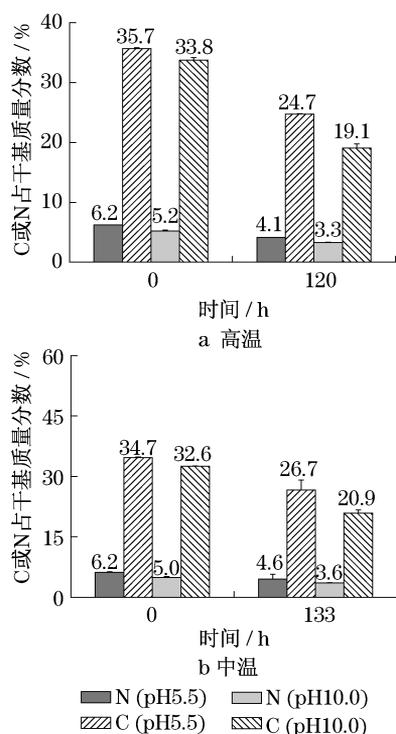


图 3 C 和 N 质量分数随水解酸化时间变化曲线

Fig.3 Carbon and nitrogen content during hydrolysis and acidification with time

综上所述,pH 值为 10.0 条件下的水解酸化工艺可以明显降低污泥中的总溴含量,但不能确定高温水解酸化是否比低温水解酸化可以减少更多的总溴含量.由于污泥样品经离心后再测定总溴含量,因此,pH 值为 10.0 条件下的水解酸化工艺的污泥中,总溴含量的降低可能是总溴从固相迁移到液相的缘故.基于此,今后有必要进一步研究,pH 值为 10.0 条件下的水解酸化工艺产生的挥发性脂肪酸(VFA),用于补充生物除磷脱氮碳源时可能存在的

潜在风险.

在以前的水解酸化工艺研究中,研究结果已表明,与 pH 值为 5.5 相比,pH 值为 10.0 可以大幅度增加 VFA 产量,但以前的研究均没有涉及污泥中总溴含量的变化趋势.本研究结果首次表明,pH 值为 10.0 条件下的水解酸化工艺可以降低污泥中的总溴含量.因此,pH 值为 10.0 条件下的水解酸化工艺,可以减少污泥处置(如土地利用、焚烧)中的总溴风险.

### 3 结论

(1) 利用高温燃烧和离子色谱联用技术测定了 8 个含有不同比例工业源(0~70%)的污水处理厂污泥样品中的总氯和总溴含量,表明污水处理厂污泥中总氯和总溴质量分数平均值分别为 1.65 和 0.09  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,总氯的质量分数(0.63~3.60  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )比总溴的质量分数(0.04~0.20  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )约高 1 个数量级.总氯的质量分数(0.63~3.60  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )比文献报道的有机氯质量分数(0.08~6.90  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )高约 2~4 个数量级.

(2) pH 值为 10.0 条件下的水解酸化工艺,对污泥中的总溴含量有明显的降低效果,但不能确定高温水解酸化是否能比低温水解酸化减少污泥中更多的总溴.

(3) 本研究结果首次表明,pH 值为 10.0 条件下的水解酸化工艺可以降低污泥中的总溴含量.因此,pH 值为 10.0 的水解酸化工艺可以减少污泥处置(如土地利用、焚烧)中的总溴风险.但是,也可能增加该工艺产生的 VFA 用于补充生物除磷脱氮的碳源时的风险.

### 参考文献:

- [1] 何晶晶,顾国维,李笃中.城市污泥处理与利用[M].北京:科学出版社,2003.  
HE Pinjing, GU Guowei, LEE Duujong. Treatment and application of municipal sludges [M]. Beijing: Science Press,2003.
- [2] 莫测辉,蔡全英,吴启堂,等.城市污泥中有机污染物的研究进展[J].农业环境保护,2001,20(4):273.  
MO Cehui, CAI Quanying, WU Qitang, et al. Research advances on organic pollutants in municipal sludge [J]. Agro-environmental Protection,2001,20(4):273.
- [3] Shomar B H, Yahya A, Müller G. Potential use of treated wastewater and sludge in the agricultural sector of the Gaza

- Strip[J]. *Clean Technology Environment Policy*, 2004, 6: 128.
- [4] Shomar B H, Yahya A, Müller G. Chemical characterization of soil and water from a wastewater treatment plant in Gaza[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2005, 14(4): 309.
- [5] 申荣艳, 骆永明, 李振高, 等. 污泥农用后有机复合污染土壤强化修复初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1501.  
SHEN Rongyan, LUO Yongming, LI Zhengao, et al. Remediation of soil contaminated by mixed organic pollutants in sewage sludges from Yangtze river delta region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1501.
- [6] Wild S R, Harrad S J, Jones K C. The influence of sewage sludge applications to agricultural land on human exposure to polychlorinated dibenzo-*P*-dioxins (PCDDs) and -frans(PCDFs)[J]. *Environmental Pollution*, 1994, 83(3): 357.
- [7] 张鸿, 罗嘉玲, 柴之芳, 等. 中子活化分析研究苹果中有机卤素污染物分布特征[J]. *核技术*, 2007, 30(4): 352.  
ZHANG Hong, LUO Jialing, CHAI Zhifang, et al. Neutron activation analysis for study of distribution patterns of organohalogen pollutants in apple[J]. *Nuclear Techniques*, 2007, 30(4): 352.
- [8] Schöler H F, Hkusi G, Niedan V W, et al. Screening of organic halogens and identification of chlorinated benzoic acids in carbonaceous meteorites[J]. *Chemosphere*, 2005, 60: 1505.
- [9] Xu D, Deng L, Chai Z, et al. Oranohalogenated compounds in pine needles from Beijing City, China[J]. *Chemosphere*, 2004, 57: 1343.
- [10] 邝仕均, 陈启钊, 龚凌, 等. 我国若干纸厂漂白废水 AOX 含量的测定[J]. *中国造纸*, 1999, 18(5): 1.  
KUANG Shijun, CHEN Qizhao, GONG Ling, et al. Determination of AOX of bleaching effluent in some paper mills of China[J]. *China Pulp & Paper*, 1999, 18(5): 1.
- [11] El-Hadj T B, Dosta J, Torres R, et al. PCB and AOX removal in mesophilic and thermophilic sewage sludge digestion [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, 36: 281.
- [12] 国家环境保护总局. GB15959—1995 水质可吸附有机卤素的测定 微库仑法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China GB15959—1995 Water quality—determination of adsorbable organic halogens (AOX)—microcoulometric method [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [13] Müller G. Sense or no-sense of the sum parameter for water soluble “adsorbable organic halogens” (AOX) and “absorbed organic halogens” (AOX - S18) for the assessment of organohalogenes in sludges and sediments [J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 371.
- [14] Wang J, Chen L, Shi H, et al. Microbial degradation of phthalic acid esters under anaerobic digestion of sludge [J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 1245.
- [15] 郜瑞莹, 王建龙. pH 对厌氧颗粒污泥吸附 4-氯酚的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 791.  
GAO Ruiying, WANG Jianlong. Effect of pH on the biosorption behavior of 4-CP onto anaerobic granular sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(4): 791.
- [16] 刘肖, 张萍, 蔡亚岐. AQF-离子色谱联用技术检测 1,4-丁炔二醇中全氯[J]. *现代科学仪器*, 2006, 2: 74.  
LIU Xiao, ZHANG Ping, CAI Yaqi. Determination of whole chloride in 1,4-Dihydroxy-2-butyne by AQF-ion chromatography [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2006, 2: 74.
- [17] Lowry O H, Rosebrough N J, Farn A, et al. Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, 193: 265.
- [18] Gaudy A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate[J]. *Industrial Water Wastes*, 1962(7): 17.
- [19] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Washington D C: American Public Health Association, 1998.
- [20] Stevens J L, Northcott G L, Stern G A, et al. PAHs, PCBs, PCNs, organochlorine pesticides, synthetic musks, and polychlorinated n-alkanes in U. K. sewage sludge: survey results and implications [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37: 462.
- [21] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, et al. Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants, China[J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 1751.
- [22] 方展强, 张润兴, 黄铭兴. 珠江河口区翡翠贻贝中有机氯农药和多氯联苯含量及分布[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(1): 113.  
FANG Zhanqiang, ZHANG Runxing, HUANG Mingxing. Concentrations and distribution of organochlorinated pesticides and PCBs in green-lipped mussels, *Perna viridis* collected from the Pearl River Estuarine Zone [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(1): 113.
- [23] 何培培, 余光辉, 邵立明, 等. 污泥中蛋白质和多糖的分布对脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3457.  
HE Peipei, YU Guanghui, SHAO Liming, et al. Effect of proteins and polysaccharides in sewage sludge on dewaterability [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(12): 3457.
- [24] Chen Y G, Jiang S, Yuan H Y, et al. Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs[J]. *Water Research*, 2007, 41: 683.
- [25] Shao L M, He P P, Yu G H, et al. Effect of proteins, polysaccharides and particle sizes on sludge dewaterability[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 83.
- [26] Yu G H, He P J, Shao L M, et al. Toward understanding the mechanism of improving the production of volatile fatty acids from activated sludge at pH 10.0 [J]. *Water Research*, 2008, 42: 4637.