

# 城市污水处理厂中 $NP_nEO$ 的迁移转化

高大文, 关俊雪, 李一凡, 任南琪

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨, gaodw@hit.edu.cn)

**摘要:** 为研究短链壬基酚聚氧乙烯醚( $NP_nEO$ ,  $n=1,2$ )在城市污水处理 A/O 工艺中的迁移转化行为, 采用固相萃取-气相色谱-质谱(SPE-GC-MS)方法测定东北某城市污水处理厂 A/O 工艺中短链  $NP_nEO$  ( $n=1,2$ )及其代谢产物(NP)在各处理单元水相和污泥相中的含量及分布. 污水处理全流程样品分析发现: 进水中  $NP_{1,2}EO$  的质量浓度较低, NP、 $NP_1EO$  和  $NP_2EO$  的平均质量浓度分别为 1 973、1 784 和 891 ng/L; 流经曝气沉砂池后 3 种物质质量浓度可达 3 326、4 228 和 2 066 ng/L, 显著高于进水中目标化合物的质量浓度水平; 经厌氧池污泥的吸附作用后,  $NP_1EO$ 、 $NP_2EO$  和 NP 含量显著降低; 二沉池出水中质量浓度分别为 351、328 和 159 ng/L. 结果表明: 厌氧段对水相中  $NP_nEO$  的去除贡献较大; 各处理阶段中  $NP_1EO$ 、 $NP_2EO$  和 NP 的质量浓度与 TOC 质量浓度呈正相关.

**关键词:** 壬基酚聚氧乙烯醚; 生物降解; 生物吸附; 迁移转化; 污水处理

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)12-0091-05

## Transport and behavior of nonylphenol ethoxylates in a full-scale municipal wastewater treatment plant

GAO Da-wen, GUAN Jun-xue, LI Yi-fan, REN Nan-qi

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, gaodw@hit.edu.cn)

**Abstract:** To study the transport and behaviour of short chain nonylphenol ethoxylates ( $NP_nEO$ ,  $n=1,2$ ) in anoxic/oxic (A/O) process of municipal wastewater treatment plant, the distribution of short chain  $NP_nEO$  and NP in the aqueous phase and sludge of each unit process in a full-scale municipal wastewater treatment plant of northeast China were investigated using a solid phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPE-GC-MS). The results showed that the influent NP,  $NP_1EO$  and  $NP_2EO$  were 1 973, 1 784 and 891 ng/L, which were lower than those of other cities in China and many other countries, then the concentrations of three compounds increased and reached to the highest at aeration grit chamber due to the biodegradation of long chain  $NP_nEO$ , which were 3 326, 4 228 and 2 066 ng/L, respectively, after that the concentrations of them were dropping down significantly at anaerobic sink because of the adsorption of activated sludge, and finally the effluent NP,  $NP_1EO$  and  $NP_2EO$  were 351, 328 and 159 ng/L. It is concluded that the anaerobic sink made more contribution for the removal of these compounds in influent. In addition, the concentrations of NP,  $NP_1EO$  and  $NP_2EO$  in each treatment unit have a positive correlation with their TOC content.

**Key words:** nonylphenol ethoxylates ( $NP_nEO$ ); biodegradation; bioadsorption; transformation behavior; wastewater treatment

收稿日期: 2010-07-25.

基金项目: 黑龙江省杰出青年基金资助项目(JC200909); 城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题(2010DX04).

作者简介: 高大文(1967—), 男, 教授, 博士生导师;

任南琪(1959—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

烷基酚聚氧乙烯醚( $AP_nEO$ ,  $n$  为乙氧基链)是全球第二大类非离子表面活性剂, 由于其特殊的物理化学性质, 广泛用作洗涤剂、乳化剂、分散剂和润湿剂.  $AP_nEO$  最主要的商业产品是壬基酚

聚氧乙烯醚( $NP_nEO$ , 占 80%~85%)和辛基酚聚氧乙烯醚( $OP_nEO$ , 占 15%以上)<sup>[1]</sup>.对  $NP_nEO$  的关注源于其雌激素活性<sup>[2]</sup>. $NP_nEO$  在生产和使用过程中很容易进入城市污水处理系统,在废水生物处理过程中,厌氧及好氧条件下  $NP_nEO$  均可被生物降解并且产生具有更强持久性、雌激素活性以及更高毒性的代谢产物,包括壬基酚一氧乙烯醚( $NP_1EO$ )、壬基酚二氧乙烯醚( $NP_2EO$ )和壬基酚( $NP$ )<sup>[3-4]</sup>,研究表明,这些代谢产物会影响生物体的繁殖、存活和生长, $NP_nEO$  ( $n=1,2$ )对一些水生生物急性毒性的半致死剂量  $LC_{50}$  最低为  $100 \mu\text{g/L}$ <sup>[5]</sup>,  $NP$  的半致死质量浓度为  $190 \mu\text{g/L}$ <sup>[6]</sup>,  $NP_nEO$  ( $n=1.5$ )的慢性毒性  $ChVs$  (Chronic Values)最低为  $10 \mu\text{g/L}$ <sup>[7]</sup>.因此,了解这些化合物在废水处理过程中的迁移转化对于开发控制这些化合物排放到环境中的技术方法非常必要.

近年来,许多国家和地区都已开始对城市污水处理厂(Sewage Treatment Plants, STPs)中该类物质进行分析调查<sup>[8-10]</sup>.本文以哈尔滨市某污水处理厂 A/O 工艺作为研究对象,该工艺日处理污水量 16 万 t,污水主要来源于城市生活污水,伴有少量的工业废水.利用固相萃取-气相-质谱(SPE-GC-MS)方法对该污水处理厂污水处理流程中  $NP_1EO$ 、 $NP_2EO$  和  $NP$  质量浓度进行检测,初步分析了短链  $NP_nEO$  在污水处理过程中的迁移转化行为.

## 1 实 验

### 1.1 标准品、试剂及材料

Pyrene-d10 购自美国 Accustandard 公司; $NP$ 、 $NP_1EO$  和  $NP_2EO$  购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司;衍生剂 bis(trimethyl)-trifluoroacetamide (BSTFA) 含 1% trimethyl-chlorosilane (TCMS) 购于美国 Supelco 公司;甲醇、丙酮、异辛烷、乙酸乙酯等溶剂均购于美国 JT. Baker 公司;固相萃取柱(C18, 500 mg/6CC)购于美国 Waters 公司.

### 1.2 仪器

旋转蒸发器(日本爱朗);氮吹仪(北京同泰联仪器有限公司,配备高纯氮气( $\geq 99.999\%$ , 哈尔滨卿华气体有限公司));TOC 测定仪(日本岛津,型号为 TOC-VCPN-SSM-5000A);超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司, KQ-500B 型);纯水仪(美国源科化实验器材有限公司);气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司,型号为 HP5890 II GC/5973MS).毛细管色谱柱长 30 m,内径 0.25 mm,膜厚 0.25  $\mu\text{m}$ (DB-5MS, 美国 Agilent

公司),载气为高纯氮气( $\geq 99.999\%$ , 哈尔滨卿华气体有限公司).

### 1.3 样品采集及前处理

2009 年 5 月~2010 年 4 月,对污水厂 A/O 工艺各处理单元出水进行采样,每月取样一次,每次采样 1 d.每个取样点分 3 个时间段采集瞬时样品(时间为 9:00、13:00 和 16:00),合并 3 次所取样品,贮于预先用丙酮清洗过的棕色玻璃瓶内.采样后尽快将样品运到实验室,置于 4  $^{\circ}\text{C}$  冷藏箱内保存,24 h 内进行预处理分析.污泥样品的采集是用不锈钢铲将样品装入预先清洗好的铝盒中,采样后用特氟龙胶带封好.带回实验室放入冰箱保存于 -20  $^{\circ}\text{C}$ ,待处理.

水样(500 mL)经 0.45  $\mu\text{m}$  玻璃纤维膜过滤后用 HCl(体积比为 1:1)酸化至 pH 约为 2~3,以 10 mL/min 的上样速度通过活化后的 C18 固相萃取柱(活化条件:10 mL 乙酸乙酯,10 mL 甲醇以及 10 mL 超纯水平衡),并用 15 mL 乙酸乙酯洗脱,最后用微弱氮气流浓缩至 1 mL,转移至 1.5 mL 样品瓶中,待测.

将保存的污泥样品在室温下解冻,放入通风厨中风干.称取约 4 g 样品放入索氏提取器中,加入 100 mL 正己烷/丙酮(体积比为 1:1)在 70  $^{\circ}\text{C}$  水浴条件下索氏提取 24 h.提取液冷却后取下,加入 5 mL 异辛烷,用旋转蒸发器浓缩至 30 mL 左右.通过无水硫酸钠,摇匀并静置 5 min,如此重复几次,直至看不到有水存在为止.用旋转蒸发器浓缩至 10 mL 左右,通过无水硫酸钠过滤,再浓缩至 1~2 mL.将浓缩液转移至硅胶柱(10 g)中,用 100 mL 正己烷/乙酸乙酯(体积比为 1:1)进行净化和组分的分离.将洗脱液浓缩至 2~3 mL,转移至 KD 浓缩瓶中,用柔和的  $N_2$  吹至 1 mL,加入 3~4 mL 异辛烷,再用  $N_2$  吹至 1.0 mL,转移至 1.5 mL 的棕色样品瓶中,待测.

### 1.4 色谱条件

样品经预处理后,加入衍生剂(BSTFA)于 70  $^{\circ}\text{C}$  水浴条件下衍生 60 min,冷却后加入内标物质 Pyrene-d10.进样口温度为 250  $^{\circ}\text{C}$ ,气相色谱柱温在 100  $^{\circ}\text{C}$  保持 1 min,接着以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度程序升温至 200  $^{\circ}\text{C}$ ,再以 3  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度升至 280  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 2 min.

### 1.5 质量保证与质量控制

对每个采样点位采集的样品分别进行 3 次平行测定,结果用均值表示.结果表明:样品检测回收率实验均在 76%~108%,相对标准偏差为 6%~13%.方法检测线定为 3 倍信噪比,定量限定为 10

倍信噪比,所有目标物仪器检测限除 NP<sub>2</sub>EO 为 1.2 ng/mL,其他物质检测限均在 0.05~0.50 ng/mL.

## 2 结果与讨论

### 2.1 NP<sub>1,2</sub>EO 在 A/O 工艺中的分布特征

#### 2.1.1 NP<sub>1,2</sub>EO 在各单元水相中的分布

A/O 工艺污水相中的 NP<sub>1,2</sub>EO 的质量浓度分布如表 1 所示,沿着 A/O 工艺处理流程,NP<sub>1,2</sub>EO 的质量浓度均呈现先升高后降低的趋势,二沉池泥水分离后出水中 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 质量浓度显著降低.

各处理单元中 NP<sub>1,2</sub>EO 的质量浓度变化较大,进水中 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 的质量浓度平均值分别为 1 973、1 784 和 891 ng/L.其中 NP 和 NP<sub>1</sub>EO 质量浓度较高,NP<sub>2</sub>EO 质量浓度相对较低.主要因为长链 NP<sub>n</sub>EO 降解形成了大量的 NP 和 NP<sub>1</sub>EO<sup>[11]</sup>.进水中目标化合物质量浓度小于北京某污水处理厂的进水,但和山西、太原等污水处理厂进水质量浓度水平相当<sup>[12]</sup>,这主要是污水的来源不同造成的.国外研究表明<sup>[13-14]</sup>,城市污水处理厂进水中 NP 的质量浓度范围为 0.69~280 μg/L,NP<sub>1</sub>EO 的质量浓度范围为 2.9~140 μg/L,NP<sub>2</sub>EO 的质量浓度范围为 0.26~67 μg/L.可见,该污水厂污水中 NP<sub>0-2</sub>EO 的质量浓度处于较低水平.

表 1 A/O 工艺各单元水相中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的质量浓度 (平均值, n=11)

处理单元	ng · L <sup>-1</sup>		
	NP	NP <sub>1</sub> EO	NP <sub>2</sub> EO
进水	1 973	1 784	891
沉砂池	3 326	4 228	2 066
初沉池	3 647	3 256	2 870
厌氧池	931	1 062	677
好氧池	672	498	284
二沉池	351	328	159

经曝气沉砂池处理后,出水中 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 质量浓度显著升高,质量浓度平均值分别达 3 326、4 228 和 2 066 ng/L,显著高于进水中目标化合物的质量浓度水平.推测主要有两方面的原因,一方面是回流污泥中含有目标化合物所致,因为该工艺在设计之初,为提高有机污染物的去除效率,降低后续处理的有机负荷,初沉池的部分污泥需回流至曝气沉砂池以补充该池中的生物量,因为这 3 种物质均具有显著的疏水性(有机碳归一化表观分配系数( $K_{oc}$ )的对数值为 5.22±

0.38),水体颗粒物对其有很强的亲合力,回流的初沉池污泥中吸附有一定量的目标化合物,这些污泥在曝气沉砂池中强烈的水流扰动下失去原有结构,使原本吸附在污泥中的目标物质重新解吸到水中所致;另一方面则可能是原水及初沉池回流到沉砂池的污泥中含有的微生物,在其自身生长代谢过程中,将长链的 NP<sub>n</sub>EO 降解为短链的 NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO,但因为曝气沉砂池中水力停留时间(HRT)很短,仅为 10~15 min 左右,所以,此部分所起作用甚微.初沉池中 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 的质量浓度平均值为 3 647、3 256 和 2 870 ng/L,其中,除 NP<sub>1</sub>EO 质量浓度显著低于曝气沉砂池出水外,NP 和 NP<sub>2</sub>EO 的质量浓度较曝气沉砂池水平略高.污水经厌氧池处理后质量浓度均有显著的降低,NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 的质量浓度分别降至 931、1 062 和 677 ng/L,这主要是由于这 3 种物质均具有疏水性而被大量吸附到厌氧污泥中,经过此单元后,大约有 80% NP<sub>n</sub>EO 从水相中去除;经好氧池处理后,3 种物质的质量浓度分别为 672、498 和 284 ng/L;最后经二沉池泥水分离后,水相中目标物质质量浓度进一步降低,分别为 351、328 和 159 ng/L.其中 NP 的质量浓度水平低于美国 EPA 制定的关于污水厂出水引起慢性毒性的阈值(6 600 ng/L).

#### 2.1.2 NP<sub>1,2</sub>EO 在各单元污泥中的分布

为进一步探讨随着污水进入污水厂的 NP<sub>1,2</sub>EO 经过多级处理后的归趋,采样过程中同时采集了 A/O 工艺各处理单元中的污水和污泥样品,并对其中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的质量浓度进行测定.需要说明的是本研究中二沉池污泥指的是污水处理厂的外排污泥,即各工艺单元剩余污泥集中于污泥消化池中统一处理后的污泥.

由表 2 可以看出,各处理单元的污泥中都检测到较高含量的目标化合物,好氧污泥中目标化合物含量最高,平均值均达 2 μg/g 以上,二沉池污泥中目标化合物含量最低,小于或等于 0.1 μg/g.目前,关于城市污水厂污泥中壬基酚类化合物含量水平差异较大.据报道,希腊北部某城市污水处理厂污泥中 NP 和 NP<sub>1</sub>EO 含量很高,分别为 1.09 和 1.08 μg/g<sup>[15]</sup>.澳大利亚某污水处理厂中 NP 含量在 20.5~429 μg/g<sup>[16]</sup>,多伦多某污水处理厂中 NP 含量在 137~470 μg/g<sup>[17]</sup>.可见,该污水厂各段污泥中目标化合物的含量均较其他地区报道结果低.为了降低城市污泥回用于农田的环境风险,欧盟关于城市污泥施用农田土壤的草案中提到 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 总和限值为

50  $\mu\text{g/g}$ 干质量.该实验结果中3种物质的总和低于此限值,因此,单就此类化合物来讲,该厂污泥可以回用于农田土壤.

表2 各处理单元污泥中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的含量  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

处理单元	NP	NP <sub>1</sub> EO	NP <sub>2</sub> EO
初沉池污泥	1.4	0.80	0.80
厌氧池污泥	1.9	1.70	1.50
好氧池污泥	2.7	2.10	2.30
二沉池污泥	0.1	0.06	0.07

## 2.2 NP<sub>1,2</sub>EO 在 A/O 工艺中的迁移转化行为

### 2.2.1 NP<sub>1,2</sub>EO 在 A/O 工艺中的去除

水相和污泥相中 NP<sub>1,2</sub>EO 的含量分布及不同单元对目标化合物的去除效果是研究目标化合物在污水厂中迁移转化行为的关键.

由图1可以看出,经过厌氧段处理后, NP、NP<sub>1,2</sub>EO 都得到显著去除,去除率在80%左右;好氧段处理后, NP、NP<sub>1,2</sub>EO 没有得到去除,反而有所增加,但是可以看出 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的增加速率不同;二沉池对 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 有显著的去 除效果,去除率在70%左右.经过该段处理后, NP、NP<sub>1,2</sub>EO 含量显著降低,最终排放到接纳水体中.

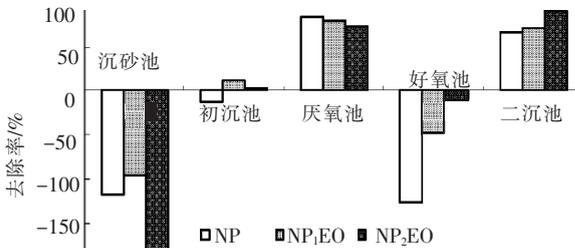


图1 A/O 工艺各单元对 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的去除率

因为厌氧和好氧处理单元中目标化合物的含量是多种作用如生物降解、污泥吸附等综合作用的结果,因此,将这两个单元合称为生物处理单元,生物处理单元和整个工艺对 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的去除率对比如图2所示.

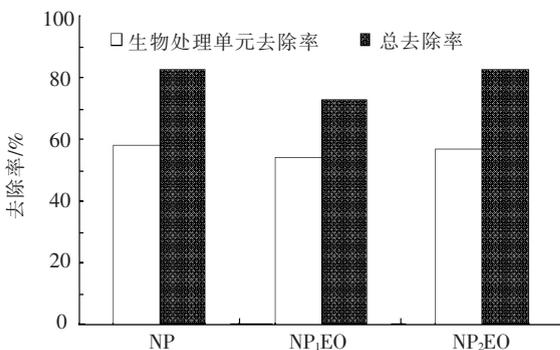


图2 A/O 工艺中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的去除率  
生物处理单元对 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 的去

除效率范围分别为 43%~90%, 54%~73% 和 57%~90%.A/O 工艺对 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO 的去除率分别为 56%~93%, 51%~91% 和 67%~91%.可见 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 主要是在生物处理单元中被去除的.

若以曝气沉砂池出水中3种物质的含量为计算基准,则该工艺对 NP、NP<sub>1</sub>EO、NP<sub>2</sub>EO 的实际去除率分别为 89.4%、92.2%、92.3%.引起这3个物质去除率差异的原因除了生物降解的速率不同以外,另一个重要的原因可能是 NP 和 NP<sub>1,2</sub>EO 在污泥上的吸附性能不同.国内外关于城市污水处理厂对 NP<sub>1,2</sub>EO 去除率的报道差异较大.笔者的研究结果与北京及北方4城市(天津、唐山、石家庄、太原)污水处理厂对该类物质的去除率(约70%)相近<sup>[18]</sup>.

### 2.2.2 NP<sub>1,2</sub>EO 在 A/O 工艺中的归趋

影响化合物在污水处理过程中归趋的主要因素是基质吸附和生物降解<sup>[19]</sup>,为了评价污水处理过程中这些作用的贡献,运用如下公式计算由各种迁移转化过程而导致的 NP<sub>n</sub>EO 的损失量<sup>[20]</sup>.

$$W_{\text{LOST}} = (Q_{\text{IN}} \times \rho_{\text{IN}}) - (Q_{\text{EF}} \times \rho_{\text{EF}}) - W_{\text{SLUDGE}}$$

式中:  $Q_{\text{IN}}$  为进水的流量( $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{EF}}$  为出水的流量( $\text{m}^3$ );  $\rho_{\text{IN}}$  为进水中目标化合物的质量浓度( $\text{ng/L}$ );  $\rho_{\text{EF}}$  为出水中目标化合物的质量浓度( $\text{ng/L}$ );  $W_{\text{SLUDGE}}$  为每天随污泥排出的量( $\text{g/d}$ ).

根据该污水厂的工艺参数,如果满负荷运行即每天处理 32.5 万 t 污水的条件下,每天可以产生 200~300 t 含水率为 80% 的污泥.经 A/O 工艺处理污水量为 16 万 t,按比例计算,每天将产生 90~130 t 含水率为 80% 的污泥.结合前面图表中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的含量计算,每天约有占总量 10% 的 NP、15% 的 NP<sub>1</sub>EO 和 18% 的 NP<sub>2</sub>EO 随出水排放,48% 的 NP、40% 的 NP<sub>1</sub>EO 和 34% 的 NP<sub>2</sub>EO 被迁移到污泥相中,其余 42% 的 NP、45% 的 NP<sub>1</sub>EO 和 48% 的 NP<sub>2</sub>EO 损失掉(图3),可能是通过生物降解转化为其他化合物(这个结果存在一定的差异,因为除了随出水和污泥排放以外,其余的目标物也可能通过其他非生物转化过程损失掉).污染物迁移到污泥相中的比例和该类物质的乙氧基链长短有关,乙氧基链越长越不易迁移到污泥相中,而容易通过生物降解被矿化.本研究与 Loyo-Rosales 等<sup>[21]</sup>对美国一个污水处理厂的质量平衡计算结果十分相近,其在研究中得出:大约 60% 的 NP<sub>n</sub>EO 随出水和污泥排放进入环境,剩余 40% 被微生物代谢,供给自身生长. Antonio 等<sup>[22]</sup>认为意大

利 5 个污水处理厂只有 53% 的 NP<sub>n</sub>EO 在活性污泥处理工艺中被彻底矿化,其余都吸附在污泥中。

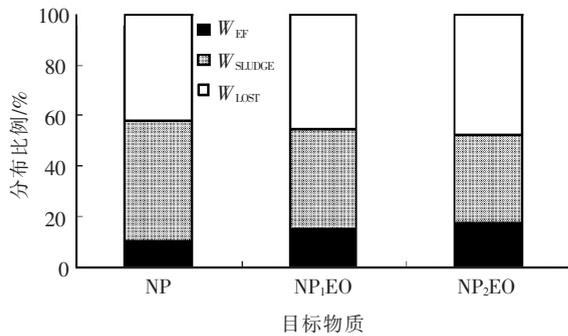


图 3 A/O 工艺中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的归趋

### 2.3 NP、NP<sub>1</sub>EO 及 NP<sub>2</sub>EO 与常规有机物的迁移转化对比

为分析 NP、NP<sub>1</sub>EO 及 NP<sub>2</sub>EO 在污水处理过程中的迁移转化规律,将各处理单元中这 3 种物质的质量浓度与其他有机物的迁移转化规律进行对比,结果见图 4(以 2009 年 5 月 NP<sub>1</sub>EO 质量浓度与 TOC 质量浓度的关系为例)。可以看出,在污水处理流程中,各处理单元的 NP<sub>1</sub>EO 质量浓度与有机物综合指标 TOC 质量浓度的变化趋势相似,说明 NP<sub>1</sub>EO 的去除了与常规有机物的去除有一定的相关性,水中总有机碳质量浓度越高, NP、NP<sub>1,2</sub>EO 类物质质量浓度也越高。试验结果表明,整个处理工艺对 TOC 的去除率为 82%。

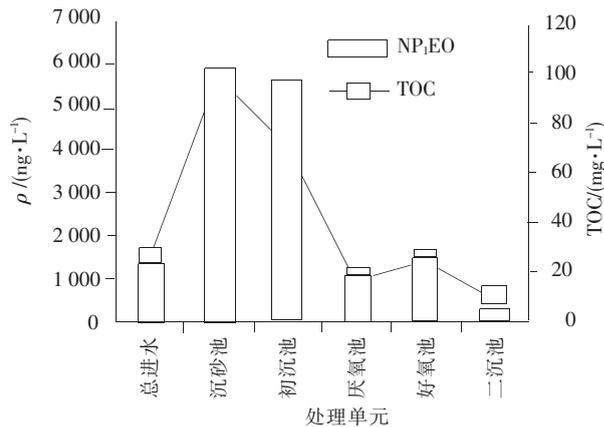


图 4 污水处理各单元中 NP<sub>1</sub>EO、TOC 的质量浓度分布

## 3 结 论

1) 污水处理厂进出水中都检测出 NP、NP<sub>1</sub>EO 和 NP<sub>2</sub>EO, 进水中质量浓度分别为 1 973、1 784 和 891 ng/L, 二沉池出水中质量浓度分别为 351、328 和 159 ng/L, 质量浓度水平和其他国家和地区的研究处于相同的数量级范围内。

2) NP、NP<sub>1,2</sub>EO 随 A/O 工艺污水处理流程呈现先升高后降低的趋势。出水中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 含量得到了很大程度的降低,但仍存在潜在的环境

风险。NP、NP<sub>1,2</sub>EO 去除途径主要有各单元污泥的吸附作用和生物处理单元生物的降解转化作用。

3) A/O 工艺中 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的迁移转化行为研究显示,每天约有占总量 10% 的 NP、15% 的 NP<sub>1</sub>EO 和 18% 的 NP<sub>2</sub>EO 随出水排放,48% 的 NP、40% 的 NP<sub>1</sub>EO 和 34% 的 NP<sub>2</sub>EO 迁移到污泥相中,其余 42% 的 NP、45% 的 NP<sub>1</sub>EO 和 48% 的 NP<sub>2</sub>EO 被微生物转化。因此,在全面评价污水处理厂对 NP、NP<sub>1,2</sub>EO 的去除效果时不能忽视污泥中目标化合物的含量。

## 参考文献:

- [1] 陈荣圻. 烷基酚聚氧乙烯醚的生态环保问题探讨 [J]. 染料与染色, 2003, 40(5): 290-292.
- [2] BROWN S D. Fate of 4-nonylphenol in a biosolids amended soil [J]. Chemosphere, 2009, 75(4): 549-554.
- [3] GONZALEZ S, PETROVIC M, BARCELO D. Removal of a broad range of surfactants from municipal wastewater - comparison between membrane bioreactor and conventional activated sludge treatment [J]. Chemosphere, 2006, 67: 335-343.
- [4] LANGFORD K M, LESTER J. The impact of process variables on the removal of PBDEs and NPEOs during simulated activated sludge treatment [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 53: 1-7.
- [5] SERVOS M R. An ecological risk assessment of nonylphenol and its ethoxylates in the aquatic environment [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2003, 9: 569-587.
- [6] COMBER M H I, STEWART K M. The effects of nonylphenol on Daphnia Magna [J]. Water Research, 1993, 27(2): 273-276.
- [7] ISOBE T, TAKADA H. Determination of degradation products of alkylphenol polyethoxylates in municipal wastewaters and rivers in Tokyo, Japan [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, 23: 599-605.
- [8] TAN B L. Modelling of the fate of selected endocrine disruptors in a municipal wastewater treatment plant in South East Queensland, Australia [J]. Chemosphere, 2007, 69: 644-654.
- [9] LOYO-ROSALES J E, RICE C P, TORRENTS A. Fate of octyl- and nonylphenol ethoxylates and some carboxylated derivatives in three American wastewater treatment plants [J]. Environment Science and Technology, 2007, 41(19): 6815-6821.

(下转第 123 页)