

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                     |                                      |                         |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 我国4个WMO/GAW本底站大气CH <sub>4</sub> 浓度及变化特征             | 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳            | (2917)                  |
| 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源                             | 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙               | (2924)                  |
| 2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析                            | 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海         | (2932)                  |
| 厦门市冬春季灰霾期间大气PM <sub>10</sub> 中多环芳烃的污染特征及来源分析        | 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红                      | (2939)                  |
| 气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用                                 | 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J | (2946)                  |
| 松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征                                | 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超                      | (2953)                  |
| 河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究                               | 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基                          | (2960)                  |
| 印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选                      | 马英歌                                  | (2967)                  |
| 烹调油烟中挥发性有机物的排放初探                                    | 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕                  | (2973)                  |
| 生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究                             | 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟                   | (2979)                  |
| 分期布液生物滴滤床净化H <sub>2</sub> S废气性能研究                   | 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪               | (2987)                  |
| 粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究                                | 孟阳,王书肖                               | (2993)                  |
| 太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价                       | 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁                 | (3000)                  |
| 巢湖水质与流域农业投入的关联性研究                                   | 张燕,高翔,张洪                             | (3009)                  |
| 巢湖十五里河水花生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性                         | 李如忠,李峰,周爱佳                           | (3014)                  |
| 巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价                              | 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉                       | (3024)                  |
| 巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性                           | 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼                | (3031)                  |
| 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究                                 | 雷沛,张洪,单保庆                            | (3038)                  |
| 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响                               | 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤                | (3046)                  |
| 平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究                             | 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波                       | (3051)                  |
| 江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析                          | 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功                | (3057)                  |
| 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价                                | 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩                 | (3064)                  |
| 南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究                                 | 刘静,路风,杨延钊,徐娜,王田妮                     | (3070)                  |
| 珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系                           | 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红                      | (3076)                  |
| 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价                            | 王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙                   | (3083)                  |
| 深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究                                | 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉                        | (3089)                  |
| 福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响                        | 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒                       | (3097)                  |
| 渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨                                | 蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟                    | (3104)                  |
| 地下水污染防治区划体系构建研究                                     | 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮                   | (3110)                  |
| 北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析                               | 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮                   | (3117)                  |
| 川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 的存储和运移 | 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风              | (3124)                  |
| 改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究                                 | 董锡臻,石宝友,解岳,王东升                       | (3132)                  |
| 水溶液中臭氧和溴离子的反应研究                                     | 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇                  | (3139)                  |
| HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布                       | 张晗,董秉直                               | (3144)                  |
| 不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOCs)产生机制研究                     | 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才                   | (3152)                  |
| 不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响                               | 况烨,周琰,王清萍,陈祖亮                        | (3160)                  |
| 多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水                                | 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶        | (3167)                  |
| 三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究                              | 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮                  | (3172)                  |
| 改性花生壳对水中镉的动态吸附研究                                    | 龙腾,易筱筠,党志                            | (3177)                  |
| 硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能                                | 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军                      | (3182)                  |
| 海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型                                    | 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰                    | (3189)                  |
| 营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复                               | 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩                       | (3197)                  |
| 生物表面活性剂强化污泥水解的研究                                    | 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平                 | (3202)                  |
| 厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定                                    | 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波                  | (3208)                  |
| 阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究                               | 李绍峰,朱静,李铁晶                           | (3214)                  |
| 农业废物堆肥中高产漆酶菌株的分离鉴定及酶学性质研究                           | 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明                   | (3220)                  |
| 糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定                                   | 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云               | (3228)                  |
| 餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析                                | 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕                | (3236)                  |
| 共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究                        | 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳                   | (3241)                  |
| <i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究      | 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳                         | (3247)                  |
| 单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应                                 | 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷                   | (3253)                  |
| 金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价                            | 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新                    | (3261)                  |
| 环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响                                 | 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵                  | (3266)                  |
| 地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究                       | 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳                       | (3272)                  |
| 焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征                               | 刘敬勇,孙水裕                              | (3279)                  |
| 城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例                              | 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞                        | (3288)                  |
| NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析                           | 连静,刘俊新                               | (3295)                  |
| 《环境科学》征订启事(3037)                                    | 《环境科学》征稿简则(3151)                     | 信息(2999,3030,3096,3227) |

# NPEOs 及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析

连静, 刘俊新\*

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 壬基酚聚氧乙烯醚(NPEOs)是一种常见的表面活性剂,但其代谢产物壬基酚(NP)等具有内分泌干扰特性,因此引起了人们的广泛关注. 以 NPEOs 及其代谢产物作为研究对象,综述了它们在城市污水处理厂中的浓度水平和迁移转化规律,并探讨了城市污水处理厂中影响 NPEOs 及其代谢产物去除效率的因素. 结果表明, NPEOs 及其代谢产物在污水处理厂的进水中普遍存在,其浓度水平与季节、地理位置、生活习惯等有关;在污水处理过程中, NPEOs 及其代谢产物的去除效率与工艺及运行参数有关. NPEOs 及其代谢产物的归趋包括生物降解、被污泥吸附和存留在出水中,内分泌干扰物质(如 NP 和 NPECs 等)在污水处理过程中被生成,并随出水和污泥进入环境,可为城市污水处理厂构建安全转化的控制技术系统提供科学依据.

**关键词:** 壬基酚聚氧乙烯醚; 壬基酚; 城市污水处理厂; 生物降解; 归趋

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3295-06

## Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants

LIAN Jing, LIU Jun-xin

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Nonylphenol ethoxylates (NPEOs), as an important group of non-ionic surfactants, have raised the society's serious concern because they can be transformed into their metabolites such as nonylphenol (NP) after biodegradation, which could cause potential disrupting effects on the endocrine system of wild animals. In this paper, NPEOs and their metabolites were taken as the research objects, and the occurrence and output pathways of NPEOs and their metabolites during the municipal wastewater treatment process were investigated, as well as the affecting factors of their removal efficiency. The results showed that NPEOs and their metabolites were ubiquitous in the influents of municipal wastewater plants, and the concentrations were related to seasons, geographic locations, living habits and so on. NPEOs and their metabolites entering WWTPs were output mainly through three pathways: biodegradation, adsorption onto sludge and release via effluents. Endocrine disrupting chemicals such as NP and NPECs were produced during the wastewater treatment process and entered the environment via effluents and sludge. The results of this paper could provide a scientific basis for the construction of safety control techniques in the municipal wastewater treatment plant.

**Key words:** Nonylphenol ethoxylates (NPEOs); nonylphenol (NP); municipal wastewater plant; biodegradation; fate

壬基酚聚氧乙烯醚(NPEOs)作为一种良好的表面活性剂,广泛应用于生产和生活的各个领域,已有超过半个世纪的使用历史. 1984 年瑞士科学家 Giger 等<sup>[1]</sup>在城市污水厂的污泥中发现了大量的毒性物质壬基酚(NP),并指出其来源是 NPEOs 的降解. NP 被认为是具有代表性的环境内分泌干扰物(endocrine-disrupters, EDs),为联合国环境保护署(UNEP)制订的 27 种优先控制的持久性有毒污染物(persistent toxic substances, PTS)之一. 另外,大量研究表明,除 NP 之外的 NPEOs 的其它降解产物,如短链 NPEOs 和短链壬基酚聚氧乙烯酸(NPECs),与其前体物质相比,也具有更强的毒性和内分泌干扰效应<sup>[2]</sup>. 因此, NPEOs 及其代谢产物的环境分布和行为引起了各国环境工作者的广泛关注.

已有的研究<sup>[3~5]</sup>表明,城市污水处理厂是环境地表水体中 NPEOs 及其代谢产物的一个重要来源. 目前,城市污水处理厂大多采用生物处理工艺处理

污水,它能有效去除污水中的常规有机污染物和营养元素(如 N 和 P),但是否也能有效去除 NPEOs 及其代谢产物并保证其在出水中的浓度不会导致受纳水体的污染,还需要进行广泛和深入地探讨. 对城市污水处理厂中 NPEOs 及其代谢产物行为和归趋进行研究,将有助于综合评价城市污水处理厂的运行效率和 NPEOs 及其代谢产物的环境风险,从而提出污染控制技术以降低出水和污泥的生态风险,因此具有重要的现实意义.

### 1 NPEOs 及其代谢产物在城市污水处理厂中的存在水平

#### 1.1 NPEOs 及其代谢产物在进水中的浓度

收稿日期: 2012-02-22; 修订日期: 2012-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51138009)

作者简介: 连静(1981~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: jinglian@rcees.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: jxliu@rcees.ac.cn

在各个国家的污水处理厂进水中,均不同程度地检出了 NPEOs 及其代谢产物(见表 1)。欧美国家的污水厂进水中,NPEOs 及其代谢产物的浓度普遍较高,相比之下,我国污水中 NPEOs 及其代谢产物

的含量处于较低水平。这与含 NPEOs 洗涤剂在各个国家的使用量有关。在日本,使用含 NPEOs 洗涤剂属违法行为,所以日本的污水厂进水中 NP 浓度很低,仅为  $0.6 \sim 3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 1 国内外污水厂进水和出水中 NPEOs 及其代谢产物的浓度

Table 1 Concentrations of nonylphenolic compounds in the influent and effluent of STPs

| 国家  | STPs | NPEOs 及其代谢产物浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$                                                              |                                                                                                           | 文献   |
|-----|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|     |      | 进水                                                                                                             | 出水                                                                                                        |      |
| 瑞士  | 11   | NP:24.2 ~ 94.6<br>NPnEOs ( $n=1,2$ ):88.7 ~ 240<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ ):865 ~ 1967<br>NPnECs:24 ~ 81          | NP:2.2 ~ 44<br>NPnEOs ( $n=1,2$ ):2.86 ~ 217.4<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ ):72.6 ~ 422.4<br>NPnECs:87 ~ 613.8 | [6]  |
| 瑞士  | 1    | NP:14<br>NPnEOs ( $n=1,2$ ):36                                                                                 | NP:8<br>NPnEOs ( $n=1,2$ ):93                                                                             | [7]  |
| 希腊  | 8    | NPnEOs ( $n=1,2$ ):9.75                                                                                        | NPnEOs ( $n=1,2$ ):2.73                                                                                   | [8]  |
| 日本  | 5    | NP:0.6 ~ 3                                                                                                     | —                                                                                                         | [9]  |
| 西班牙 | 1    | NPnEOs ( $n=0 \sim 2$ ):140.0                                                                                  | NPnEOs ( $n=0 \sim 2$ ):1.99                                                                              | [10] |
| 美国  | 4    | NPnEOs ( $n=0 \sim 15$ ):425-894<br>NPnECs:0.28 ~ 3.2                                                          | NPnEOs ( $n=0 \sim 15$ ):1.62 ~ 38.2<br>NPnECs:7.46 ~ 99.3                                                | [11] |
| 意大利 | 5    | NPnEOs ( $n=0 \sim 15$ ):29 ~ 145                                                                              | NPnEOs ( $n=0 \sim 15$ ):1.7 ~ 6.6<br>NPnECs:0.6 ~ 15<br>CAPECs:7.92 ~ 48.43                              | [12] |
| 中国  | 1    | NP:19.26                                                                                                       | NP:4.57                                                                                                   | [13] |
| 中国  | 1    | NPnEOs ( $n=0 \sim 2$ ):39.0<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ ):20.5                                                     | NPnEOs ( $n=0 \sim 2$ ):11.6<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ ):30.1                                                | [14] |
| 中国  | 4    | NPnEOs( $n=0 \sim 15$ ):9.52 ~ 214.2                                                                           | NPnEOs ( $n=0 \sim 15$ ):0.04 ~ 0.35                                                                      | [15] |
| 中国  | 4    | NP:4.18 ~ 18.7<br>NPnEOs ( $n=1,2$ ):8.96 ~ 29.68<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ ):2.38 ~ 65.56<br>NPnECs:6.44 ~ 60.72 | NP:ND ~ 0.44<br>NPnEOs ( $n=1,2$ ):ND ~ 2.24<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ ):ND ~ 1.19<br>NPnECs:5.06 ~ 14.72    | [16] |
| 美国  | 1    | —                                                                                                              | NPnECs:143 ~ 272                                                                                          | [17] |

根据 NPEOs 及其代谢产物的链长及特性,本研究将其分为四类进行讨论,分别是:NP、NPnEOs( $n=1,2$ )、NPnEOs( $n \geq 3$ )和 NPECs,其中  $n$  代表所含乙氧基的个数。除 NPnEOs( $n \geq 3$ )外,其它三类都具有内分泌干扰特性。国外的调查数据表明,污水厂的进水中以长链 NPEOs 为主;瑞士的 11 个受调查的污水厂<sup>[6]</sup>进水中 NPnEOs( $n \geq 3$ )占绝大多数(平均 82%),其次是 NPnEOs( $n=1,2$ )(12%),然后是 NP 和 NPECs(各 3%);美国受调查的污水厂<sup>[11]</sup>进水中也是以 NPEOs( $n \geq 3$ )为主,NP 和 NPnEO( $n=1,2$ )占 NPEOs 及其代谢产物总量的 23% ~ 42%。这说明 NPEOs 洗涤剂在进入污水处理厂之前,没有发生很大程度上的降解。而对于中国污水厂的调查结果并不完全一致。侯邵刚等<sup>[15]</sup>在调查中国北方 4 个污水处理厂的结果中提到,进水中以具有中长链的 NPnEOs( $4 \leq n \leq 10$ )为主,而短链( $n < 4$ )和长链( $n > 10$ )NPnEOs 所占比例较少。这与国外的调查结果类似;但马兴杰等<sup>[14]</sup>在调

查北京某污水处理厂时发现,进水中除含有以聚合度 9 为中心呈 Poisson 分布的长链 NPEOs 外,还检测出很高浓度的 NP 和 NPnEOs( $n=1,2$ ),其浓度总和约占 NPEOs 及其代谢产物总量的 82.7%;笔者对北京 4 个污水处理厂的调查结果也显示,NP、NPnEOs( $n=1,2$ )和 NPECs 总量相对于 NPnEOs( $n \geq 3$ )来说占有更大的比例,达到 68.3% ~ 94.7%<sup>[16]</sup>。这可能是由于我国城市规模相对于国外都较大,特别是北京这样的超大型城市,污水管道较长,污水在进入污水处理厂之前的管道内流动时间较长,大量的长链 NPEOs 发生降解反应,导致污水处理厂进水中 NPEOs( $n \geq 3$ )浓度降低。

调查结果发现,污水厂进水中 NPEOs 及其代谢产物的浓度不仅受当地 NPEOs 洗涤剂使用量的影响,而且与季节及采样时间有关。夏季进水中 NPEOs 及其代谢产物的浓度往往高于冬季进水<sup>[16]</sup>,原因是高温时,洗涤次数增加,使用的 NPEOs 数量较大。NPEOs 及其代谢产物在一周之内的浓度也不

尽相同;Ahel 等发现<sup>[6]</sup>,在工作日(周一至周五),污水厂进水中 NPEOs 及其代谢产物的浓度是周末进水中浓度的 1.6 倍;并且发现,下午浓度最高,夜晚浓度最低,这些都与 NPEOs 洗涤剂在不同时间段的用量差异有关. 另外,雨天污水厂进水中 NPEOs 及其代谢产物总浓度大约是晴天的 60%,而连续降雨时,污水厂的进水流量比平时流量增大三分之一<sup>[16]</sup>,因此,雨水的稀释降低了进水中 NPEOs 及其代谢产物的总浓度.

1.2 NPEOs 及其代谢产物在出水中的浓度

在污水处理过程中,除常规污染物被有效的去除外,NPEOs 及其代谢产物浓度也发生了变化. 表 1 同时列出了国内外污水厂出水中 NPEOs 及其代谢产物的浓度. 对比表 1 中各国污水厂进水和出水的浓度可以看出,污水处理厂对 NPEOs 及其代谢产物总浓度的去除率达 70% 以上. 在出水中,4 类 NPEOs 及其代谢产物均有检出,而且还检测出 NPEOs 的好氧降解产物 NPECs. 例如,瑞士的受调查污水厂中<sup>[6]</sup>,NP1EC 和 NP2EC 在出水中占 NPEOs 及其代谢产物总浓度的 46%;其次是 NPnEOs( $n \geq 3$ ),占 NPEOs 及其代谢产物总浓度的

28%;然后是 NPnEOs( $n = 1, 2$ ),占 22%;NP 所占比例最小,为 4%. 笔者在之前的调查结果显示,出水中 NPECs 的浓度占 NPEOs 及其代谢产物总浓度的 81.94%~96.33%<sup>[16]</sup>. 这说明 NPECs 是污水厂出水中的主要代谢产物. 由此可以初步推测,不论是否发生 EO 链的缩短反应,EO 链的羧酸化反应在污水处理厂的生物降解过程中占主导作用.

另外,出水中还检测出壬基链和乙氧基链均被羧酸化的 CNPEC. Corcia 等<sup>[12]</sup>对意大利某污水厂进行了 4 个月的监测,结果表明,CAPEC 占出水中 NPEOs 及其代谢产物的 66%,其中以 CA8PEC 和 CA6PEC 居多,占到 CAPEC 总量的 87%. 这表明 NPEOs 在发生 EO 链的  $\omega$  羧化作用转变成 NPECs 的同时,壬基链也发生氧化作用,生成带有 2 个羧基的不同链长的 CNPEC<sup>[18]</sup>.

1.3 NPEOs 及其代谢产物在污泥中的含量

在污水生物处理工艺中,微生物对 NPEOs 及其代谢产物具有降解和转化作用,同时,活性污泥对 NPEOs 及其代谢产物的吸附能力也不容忽视. 表 2 为部分国家的城市污水处理厂污泥中 NPEOs 及其代谢产物的含量.

表 2 国内外城市污泥中 NPEOs 及其代谢产物的含量

| Table 2 Concentrations of NPnEOs ( $n = 0 \sim 2$ ) in sewage sludge of different countries |        |                                                                                                             |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 国家                                                                                          | 污泥来源   | 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$                                                                        | 文献   |
| 中国                                                                                          | 消化污泥   | NP;0.19<br>NP1EO:0.07<br>NP2EO;0.6                                                                          | [14] |
|                                                                                             |        | NP;2.61~12.42<br>NP1EO;2.2~29.88<br>NP2EO;0.47~40.56                                                        |      |
|                                                                                             |        | NP;100.93<br>NP1EO;10.26<br>NP2EO;8.34                                                                      |      |
| 中国                                                                                          | 活性污泥   | NP;2.52~22.25<br>NPnEOs ( $n = 1, 2$ );4.09~41.04<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ );1.03~63.54<br>NPnECs;2.99~116.46 | [16] |
|                                                                                             |        | NP;154.08<br>NPnEOs ( $n = 1, 2$ );28.3<br>NPnEOs ( $n \geq 3$ );1.12<br>NPnECs;23.48                       |      |
|                                                                                             |        | NP;12.44~143.69<br>NP1EO; $\leq 204.84$<br>NP2EO;no detected                                                |      |
| 西班牙                                                                                         | 剩余污泥   | NP;26.32~1290.03<br>NP1EO;4.61~311.4<br>NP2EO; $\leq 206.69$                                                | [20] |
|                                                                                             | 脱水消化污泥 |                                                                                                             |      |
| 意大利                                                                                         | 剩余污泥   | NP;242                                                                                                      | [21] |
|                                                                                             | 厌氧消化污泥 | NP;308                                                                                                      |      |
| 瑞士                                                                                          | 厌氧消化污泥 | NP;640~2200                                                                                                 | [22] |
|                                                                                             | 好氧消化污泥 | NP;120~650                                                                                                  |      |
| 美国                                                                                          | 厌氧消化污泥 | NP;754                                                                                                      | [23] |
| 美国                                                                                          | 好氧消化污泥 | NP;1100~1800                                                                                                | [24] |

由表 2 可看出,各污水处理厂污泥中 NPEOs 及其代谢产物的浓度一般在  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  量级。我国城市污水处理厂污泥中 NPEOs 及其代谢产物的含量相对较低,这与污水厂进水中浓度低是一致的。目前我国城市污泥中 NPEOs 及其代谢产物的含量的数据还比较少,并不能完整代表我国城市污泥中 NPEOs 及其代谢产物的存在水平,还有待进一步的调查研究。目前,欧盟和丹麦对城市污泥中 NP 的浓度进行了限制。丹麦规定 NP、NP1EO 和 NP2EO 的浓度总和不能超过  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,但从上表来看,大多数国家的城市污水处理厂污泥中,仅 NP 就大大超过了这个标准。另外,值得注意的是,NP 在厌氧消化污泥中的浓度远大于在活性污泥中的浓度,这可能是由于厌氧消化过程中 NPEOs 倾向于发生 EO 链的缩短反应,从而导致污泥中短链 NPEOs 和 NP 的累积<sup>[25-27]</sup>。

## 2 NPEOs 及其代谢产物在城市污水处理厂中的迁移转化

一般认为,NPEOs 及其代谢产物在污水处理厂的迁出途径主要有生物降解、污泥吸附和随出水排出这 3 种。国外的研究表明,进水中的多数 NPEOs 及其代谢产物随出水和污泥排出污水处理厂。例如,瑞士 11 个污水处理厂进水中的 NPEOs 及其代谢产物,有 60% ~ 65% 随出水和污泥排入自然环境<sup>[6]</sup>;美国 3 个污水厂中<sup>[11]</sup>,第一个污水厂中 NPEOs 及其代谢产物的分布与瑞士调查结果接近,约有 60% 的 NPEOs 及其代谢产物随污泥和出水排入自然界,其中污泥中占 19%,出水中占 39%,余下的 42% 推测被生物降解;第三个污水厂中,排出自然界的 NPEOs 及其代谢产物比较少,冬季为 40%,夏季为 30%;而第二个污水厂中,大部分 NPEOs 及其代谢产物转移到了污泥上,导致约 90% 的 NPEOs 及其代谢产物排出自然界。作者分析造成这种差异的原因可能是第二个污水厂的污泥龄(SRT)较短,因此生物降解能力减弱,污泥吸附能力增强。同时作者认为,要得到更加准确的分布情况,需要更加全面地分析各种代谢产物,以及更加准确地了解污水厂的运行参数。Lian 等<sup>[16]</sup>对北京市的 4 个污水处理厂的调查结果显示,21.8% ~ 47.6% 的 NPEOs 及代谢产物通过出水和污泥排放到环境中,较国外调查结果偏低,说明生物降解作用更加强大,这可能与采取的工艺及相关运行参数有关。

目前,有关 NP 在污水处理厂的归趋的报道较

多。由于 NP 具有较强的亲脂性,其迁出与去除途径主要是初沉池污泥和二沉池活性污泥的吸附作用,其次是曝气池的生物降解作用,随出水排放所占比例较小<sup>[14,28,29]</sup>。对于 NP 进入污水处理工艺的途径,有报道称一是原水,二是泥区回流液。原水中的 NP 可能是 NPEOs 在城市排污管道内发生厌氧分解产生的,泥区回流液中的 NP 主要是在污泥浓缩和厌氧处置过程中产生的<sup>[28]</sup>。对于 NPnEOs ( $n=1,2$ ),笔者在之前的研究中发现<sup>[16]</sup>,进水中 NPnEOs ( $n=1,2$ ) 大多数被生物降解[占进水中 NPnEOs ( $n=1,2$ ) 的  $59\% \pm 26\%$ ],其次是吸附于污泥上(占  $41\% \pm 27\%$ ),剩余一小部分随出水排出,比例为  $1.5\% \pm 1.0\%$ 。NPnEOs ( $n=1,2$ ) 和 NP 一样具有较强的疏水性,因此吸附于污泥上是其很重要的一个迁出途径。大部分 NPEOs ( $n \geq 3$ ) 被生物降解,或发生矿化,或转化为其它降解产物,只有少部分存在于污泥上和出水中;而对于 NPECs,被生物降解与被生成的反应同时存在,导致出水中 NP 类物质以 NPECs 为主<sup>[16]</sup>。Jobling 等<sup>[30]</sup>指出,NPECs,尤其是 NPnECs ( $n=1,2$ ),具有与短链 NPEOs 相当的内分泌干扰效应。因此,出水中大量存在的 NPECs 应当引起足够的重视,并采取有效措施进一步去除。

## 3 影响城市污水处理厂中 NPEOs 及其代谢产物去除率的因素

通常认为,NPEOs 及其代谢产物在污水处理厂的去除率与温度有关,温度升高使微生物代谢活性增强,导致 NPEOs 及其代谢产物的降解率提高。美国污水厂的调查结果<sup>[11]</sup>显示,夏天 NPnEOs ( $n=0 \sim 3$ ) 占美国污水厂进水中 NPEOs 及其代谢产物总量的 42%,而冬天为 23%,其原因是夏天温度升高,使更多的长链 NPEOs 在进入污水厂之前就发生了降解。而冬季出水中 NPEOs 及其代谢产物的总浓度是夏季的 7 倍,也是由于相对于夏季,大量的 NP 类物质由于温度降低,微生物活性减弱未被降解所致。另外,瑞士污水厂的调查结果也同样证明温度影响 NP 类物质的去除效果<sup>[6]</sup>:在  $10 \sim 13^\circ\text{C}$  时,NP 的去除率是 65%,而在  $20^\circ\text{C}$  时,NP 的去除率增长为 82%。

很多学者研究了 NPEOs 及其代谢产物在污水处理厂的去除率与污水厂运行参数之间的关系,认为 HRT 时间延长有利于有机微污染物的降解。Johnson 等<sup>[31]</sup>指出,HRT 为  $4 \sim 14\text{ h}$  的污水处理厂对于内分泌干扰物质的去除率比  $\text{HRT} < 1\text{ h}$  的滴滤

池好的多;但是 Joss 等<sup>[32]</sup>使用 HRT 约为 35 min 的固定床反应器,同样达到有效去除内分泌干扰物质的目的,这说明有关 HRT 对有机微污染物去除率的影响存在争议。当然这种不一致可能是由于各污水厂的进水和采取的处理工艺差异较大,且采样和分析方法各不相同,导致数据的可比性差所致<sup>[33]</sup>。有关 SRT 对内分泌干扰物质去除的影响,研究者认为,污泥龄增加,导致生物反应器内微生物种群多样化,促进了对内分泌干扰物质的降解<sup>[34,35]</sup>。此外,污泥龄的增加可能改变污泥颗粒表面的物理化学性质(如电负性),从而影响污泥颗粒对内分泌干扰物质的吸附能力,而导致去除率发生变化。而笔者之前对北京市 4 个污水处理厂的 SRT 和 NP 类物质去除率的关系的研究并未发现其有显著的统计相关性<sup>[16]</sup>,这可能与受调查的污水处理厂的运行工艺差异较大有关<sup>[36]</sup>。

此外,关于 NPEOs 及其代谢产物的去除和常规指标(如 COD 和 TOC)的去除之间的联系也存在争议。有文献报道称,NPEOs 及其代谢产物的去除与有机碳的去除有一定的相关性<sup>[6,37]</sup>;但多数学者认为二者之间并无必然的联系<sup>[6,11]</sup>。另外,Ahel 等<sup>[6]</sup>还发现在硝化条件和低污泥负荷下,NPEOs 及其代谢产物呈现较好的去除率,且发现部分 NPEOs 及其代谢产物的去除率和氨氮的去除率呈线性相关性。但也有研究称<sup>[38]</sup>,反硝化条件才能够促进长链 NPEOs 的降解。这些因素是否真正影响着 NPEOs 及其代谢产物在污水处理厂的去除效果,以及影响机制如何,还需要通过更多的调查数据和实验数据支撑和证实。

#### 4 结论与建议

综上所述,NPEOs 及其代谢产物在污水处理厂的进水中广泛存在,城市污水处理过程对于 NPEOs 及其代谢产物有一定的去除效果,但有部分在污水处理过程中产生的内分泌干扰效应较强的 NP 和 NPECs 等物质随出水和污泥进入环境,这需要引起重视。目前有关 NPEOs 及其代谢产物的降解途径、影响因素、与其它有机物协同降解机制等尚不十分清楚,需要运用其它的实验手段或更为先进的分析检测技术,对降解产物进行全面的分析,从而更加全面和具体地表述 NPEOs 及其代谢产物在污水生物处理过程中的迁移转化规律。另外,NPEOs 及其代谢产物经过污水生物处理后,很大一部分转化为 NP 和短链 NPEOs,在污泥上发生累积。因此,有必要针

对污泥上大量存在的 NP 和短链 NPEOs,提出相应的污泥处理技术,以降低因污泥回用造成的生态风险。

#### 参考文献:

- [1] Giger W, Brunner P H, Schaffner C. 4-nonylphenol in sewage sludge: accumulation of toxic metabolites from nonionic surfactants[J]. Science, 1984, **225**(4662): 623-625.
- [2] Mueller G C, Kim U H. Displacement of estradiol from estrogen receptors by simple alkyl phenols[J]. Endocrinology, 1978, **102**(5): 1429-1435.
- [3] González M M, Martín J, Santos J L, *et al.* Occurrence and risk assessment of nonylphenol and nonylphenol ethoxylates in sewage sludge from different conventional treatment processes [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(3): 563-570.
- [4] Guruge K S, Horii Y, Yamashita N. Profiles of nonylphenol isomers in surface waters from Sri Lanka[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(4): 870-873.
- [5] Choi M, Furlong E T, Moon H B, *et al.* Contamination of nonylphenolic compounds in creek water, wastewater treatment plant effluents, and sediments from Lake Shihwa and vicinity, Korea: comparison with fecal pollution [J]. Chemosphere, 2011, **85**(8): 1406-1413.
- [6] Ahel M, Giger W, Koch M. Behaviour of alkylphenol polyethoxylate surfactants in the aquatic environment- I. Occurrence and transformation in sewage treatment[J]. Water Research, 1994, **28**(5): 1131-1142.
- [7] Ahel M, Giger W. Determination of nonionic surfactants of the alkylphenol polyethoxylate type by high-performance liquid chromatography [J]. Analytical Chemistry, 1985, **57**(13): 2584-2590.
- [8] Stasinakis A S, Gatidou G, Mamais D, *et al.* Occurrence and fate of endocrine disrupters in Greek sewage treatment plants[J]. Water Research, 2008, **42**(6-7): 1796-1804.
- [9] Fujita M, Ike M, Mori K, *et al.* Behaviour of nonylphenol ethoxylates in sewage treatment plants in Japan-biotransformation and ecotoxicity[J]. Water Science and Technology, 2000, **42**(7-8): 23-30.
- [10] Planas C, Guadayol J M, Drogue M, *et al.* Degradation of polyethoxylated nonylphenols in a sewage treatment plant. Quantitative analysis by isotopic dilution-HRGC/MS[J]. Water Research, 2002, **36**(4): 982-988.
- [11] 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]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(19): 6815-6821.
- [12] Corcia A D, Cavallo R, Crescenzi C, *et al.* Occurrence and abundance of dicarboxylated metabolites of nonylphenol polyethoxylate surfactants in treated sewages[J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(18): 3914-3919.
- [13] 郝瑞霞, 梁鹏, 赵曼, 等. 城市污水再生处理过程中壬基酚的迁移转化行为研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, **7**(2): 66-70.

- [14] 马兴杰, 邵兵, 胡建英, 等. 壬基酚聚氧乙烯醚在污水处理过程中的迁移转化行为[J]. 环境科学, 2002, **23**(5): 80-83.
- [15] 侯邵刚, 孙红文. NPnEO 在中国北方四城市污水处理厂的污染研究[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(3): 61-66.
- [16] Lian J, Liu J X, Wei Y S. Fate of nonylphenol polyethoxylates and their metabolites in four Beijing wastewater treatment plants [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(14): 4261-4268.
- [17] Field J A, Reed R L. Nonylphenol polyethoxy carboxylate metabolites of nonionic surfactants in U. S. paper mill effluents, municipal sewage treatment plant effluents, and river waters[J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(12): 3544-3550.
- [18] Jonkers N, Knepper T P, De Voogt P. Aerobic biodegradation studies of nonylphenol ethoxylates in river water using liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(2): 335-340.
- [19] 乔玉霜, 张晶, 张昱, 等. 污水处理厂污泥中几种典型酚类内分泌干扰物的调查[J]. 环境化学, 2007, **26**(5): 671-674.
- [20] Aparicio I, Santos J L, Alonso E. Simultaneous sonication-assisted extraction, and determination by gas chromatography-mass spectrometry, of di-(2-ethylhexyl) phthalate, nonylphenol, nonylphenol ethoxylates and polychlorinated biphenyls in sludge from wastewater treatment plants[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, **584**(2): 455-461.
- [21] Bruno F, Curini R, Corcia A D, *et al.* Determination of surfactants and some of their metabolites in untreated and anaerobically digested sewage sludge by subcritical water extraction followed by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(19): 4156-4161.
- [22] Brunner P H, Capri S, Marcomini A, *et al.* Occurrence and behaviour of linear alkylbenzenesulphonates nonylphenol, nonylphenol mono-and nonylphenol diethoxylates in sewage and sewage sludge treatment[J]. Water Research, 1988, **22**(12): 1465-1472.
- [23] La Guarkia M J, Hale R C, Harvey E, *et al.* Alkylphenol ethoxylate degradation products in land-applied sewage sludge (biosolids) [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(24): 4798-4804.
- [24] Pryor S W, Hay A G, Walker L P. Nonylphenol in anaerobically digested sewage sludge from New York state[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(17): 3678-3682.
- [25] 赵建亮, 张高勇, 秦勇, 等. 壬基酚聚氧乙烯醚好氧生物降解性的研究[J]. 精细化工, 2006, **23**(4): 350-354.
- [26] Langford K H, Scrimshaw M D, Birkett J W, *et al.* Degradation of nonylphenolic surfactants in activated sludge batch tests [J]. Water Research, 2005, **39**(5): 870-876.
- [27] Langford K H, Scrimshaw M D, Birkett J W, *et al.* The partitioning of alkylphenolic surfactants and polybrominated diphenyl ether flame retardants in activated sludge batch tests [J]. Chemosphere, 2005, **61**(9): 1221-1230.
- [28] 郝瑞霞, 梁鹏, 周玉文. 城市污水处理过程中壬基酚的迁移转化途径研究[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(1): 105-108.
- [29] 金星龙, 江桂斌, 黄国兰, 等. 污水处理流程中几种典型酚类化合物的分布[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(6): 1027-1031.
- [30] Jobling S, Sumpter J P. Detergent components in sewage effluent are weakly oestrogenic to fish: an in vitro study using rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) hepatocytes [J]. Aquatic Toxicology, 1993, **27**(3-4): 361-372.
- [31] Johnson A C, Sumpter J P. Removal of endocrine-disrupting chemicals in activated sludge treatment works[J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(24): 4697-4703.
- [32] Joss A, Andersen H, Ternes T, *et al.* Removal of estrogens in municipal wastewater treatment under aerobic and anaerobic conditions: consequences for plant optimization [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(11): 3047-3055.
- [33] 聂亚峰, 强志民, 张鹤清, 等. 内分泌干扰物在城市污水处理厂中的行为和归趋: 综述[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(7): 1352-1362.
- [34] Clara M, Kreuzinger N, Strenn B, *et al.* The solids retention time-a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants[J]. Water Research, 2005, **39**(1): 97-106.
- [35] Langford K H, Scrimshaw M D, Birkett J W, *et al.* Degradation of nonylphenolic surfactants in activated sludge batch tests [J]. Water Research, 2005, **39**(5): 870-876.
- [36] 连静. NPEOs 及其代谢产物在污水处理工艺中的迁移转化规律研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2009. 66-68.
- [37] Ding W H, Fujita Y, Aeschmann R, *et al.* Identification of organic residues in tertiary effluents by GC/EI-MS, GC/CI-MS, and GC/TSQ-MS [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1996, **354**(1): 48-55.
- [38] Lu J, Jin Q, He Y L, *et al.* Enhanced anaerobic biodegradation of nonylphenol ethoxylates by introducing additional sulfate or nitrate as terminal electron acceptors [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2008, **62**(2): 214-218.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                      |                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| CH <sub>4</sub> Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China .....                                              | FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> ( 2917 )         |
| Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources .....                                                           | LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> ( 2924 )         |
| Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games .....                                                             | LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> ( 2932 )    |
| Characteristics and Sources of PM <sub>10</sub> -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen .....                                                      | QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> ( 2939 )    |
| Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split .....                                                                                      | WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 2946 )      |
| Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area .....                                              | ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> ( 2953 )             |
| Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households .....                                                               | ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji ( 2960 )                   |
| Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories .....                                                    | MA Ying-ge ( 2967 )                                                  |
| Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils .....                                                                     | HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> ( 2973 )              |
| Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF .....                                               | HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> ( 2979 )         |
| Performance of Cross Flow Trickling Filter for H <sub>2</sub> S Gas Treatment .....                                                                                  | LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> ( 2987 )              |
| Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization .....                                                                                                       | MENG Yang, WANG Shu-xiao ( 2993 )                                    |
| Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability .....                                   | LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> ( 3000 )          |
| Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin .....                                                             | ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong ( 3009 )                            |
| Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake .....                      | LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia ( 3014 )                           |
| Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification .....                                          | LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> ( 3024 )  |
| Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake .....             | CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> ( 3031 )    |
| Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir .....                                            | LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing ( 3038 )                          |
| Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....                                                                | LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> ( 3046 )           |
| Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China .....                                            | YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> ( 3051 )  |
| Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province .....                                                  | LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> ( 3057 )            |
| Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu .....                   | GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> ( 3064 )           |
| Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin .....                                                   | LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> ( 3070 )             |
| Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water .....                                                                                 | HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> ( 3076 )   |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin .....                                                              | WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> ( 3083 )         |
| Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen .....                                                                   | SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> ( 3089 )        |
| Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast ..... | GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> ( 3097 )       |
| Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay .....                                                                                 | CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> ( 3104 )           |
| Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System .....                                                                                            | WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> ( 3110 )           |
| Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain .....                                                                             | LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> ( 3117 )           |
| Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan .....                                             | YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> ( 3124 )  |
| Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons .....                                                                                  | TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> ( 3132 )           |
| Investigation of the Oxidation Reaction of O <sub>3</sub> with Bromide Ion in Aqueous Solution .....                                                                 | YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> ( 3139 )      |
| Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors .....        | ZHANG Han, DONG Bing-zhi ( 3144 )                                    |
| Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds .....                                              | LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> ( 3152 )           |
| Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values .....                                                             | KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> ( 3160 )           |
| Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor .....                                    | LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> ( 3167 )        |
| Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor .....                                                        | XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> ( 3172 )    |
| Dynamic Adsorption of Cadmium ( II ) in Water on Modified Peanut Shells .....                                                                                        | LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi ( 3177 )                            |
| Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides .....                                                                                      | WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> ( 3182 )    |
| Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter .....                                                                           | LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> ( 3189 )  |
| Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery .....                                                                                   | ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> ( 3197 )       |
| Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant .....                                                                                                 | YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> ( 3202 )                     |
| Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria .....                                                                                         | LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> ( 3208 ) |
| Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium .....                                                                              | LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing ( 3214 )                         |
| Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting .....                   | REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> ( 3220 )    |
| Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash .....                                                                       | LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> ( 3228 )               |
| Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste .....                                                                       | LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> ( 3236 )      |
| Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes .....                                              | WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> ( 3241 )            |
| Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors .....                                                                 | ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> ( 3247 )                 |
| Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress .....                                                                                | WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 3253 )     |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities .....         | HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> ( 3261 )     |
| Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i> .....                                                        | DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> ( 3266 )      |
| Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash .....                                                               | JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> ( 3272 )           |
| Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature .....            | LIU Jing-yong, SUN Shui-yu ( 3279 )                                  |
| Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen .....                                                                     | YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> ( 3288 )          |
| Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants .....                                                                                    | LIAN Jing, LIU Jun-xin ( 3295 )                                      |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

( HUANJING KEXUE )

(月刊 1976年8月创刊)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 15, 2012

|       |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管   | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办   | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办   | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编   | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑   | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版   | 科学出版社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                                 | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印刷装订  | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行   | 科学出版社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencecp. com                                                                                                   | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencecp. com                                                                                                                                              |
| 订 购 处 | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行