

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                           |                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM <sub>2.5</sub> .....                        | 郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)                                 |
| 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究 .....                                          | 林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)                       |
| 气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析 .....                                               | 浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)                       |
| 密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析 .....                                            | 路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842) |
| 冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量 .....                                          | 何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)                                       |
| 2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化 .....                                         | 李绪录, 周毅频, 夏华永(857)                                      |
| 渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析 .....                                                 | 周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)                             |
| 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化 .....                                                 | 王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)                              |
| 漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选 .....                                           | 徐华山, 徐宗学, 刘品(882)                                       |
| 面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法 .....                                                 | 邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)                       |
| 九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献 .....                                             | 罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)                                 |
| 修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究 .....                                        | 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)                   |
| 去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究 .....                                                  | 李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)                              |
| 北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究 .....                                                   | 李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)                                  |
| 城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险 .....                                   | 温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)                                  |
| 城市景观娱乐水体微生物风险评价 .....                                                     | 孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)                                   |
| 模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究 .....                                       | 李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)                                    |
| 膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究 .....                                            | 范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)                        |
| $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 负载磷钨酸催化强化电催化法处理水中酸性大红3R的研究 ..... | 岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)                     |
| 活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学 .....                                                   | 杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)                                   |
| ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究 .....                                                | 杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)                                    |
| O <sub>3</sub> -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律 .....                               | 余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)                |
| 规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究 .....                                     | 王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)                                  |
| 连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究 .....                                           | 牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)                    |
| 乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立 .....                                     | 张超, 陈银广(993)                                            |
| 乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟 .....                                     | 张超, 陈银广(998)                                            |
| 乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用 .....                                     | 张超, 陈银广(1004)                                           |
| 三峡水库两条支流水-气界面CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 通量比较初探 .....                | 李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)                               |
| 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素 .....                                              | 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)                        |
| 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素 .....                                            | 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)                           |
| 层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估 .....                                           | 姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)              |
| 海州湾滩涂重金属污染的历史记录 .....                                                     | 张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)                |
| 草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价 .....                                         | 张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)                            |
| 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析 .....                                                 | 程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)                        |
| 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估 .....                                        | 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)                            |
| 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估 .....                                        | 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)                            |
| 城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究 .....                                             | 陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)                                      |
| 典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义 .....                                        | 龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)     |
| 生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究 .....                                                    | 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)                  |
| 三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究 .....                                          | 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)                                 |
| Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素 .....                                          | 钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)                            |
| 新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险 .....                                   | 马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)                     |
| 青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源 .....                                        | 何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)                        |
| 太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布 .....                                         | 马召辉, 金军, 亢学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)                    |
| 典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析 .....                                              | 刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)                                 |
| 柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性 .....                                                     | 谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)                                 |
| 机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究 .....                                               | 牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)                             |
| 污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较 .....                                            | 崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)                            |
| 固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响 .....                                             | 刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)                                      |
| 铸造废砂的环境毒性研究 .....                                                         | 张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)                            |
| Cr <sup>6+</sup> 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征 .....                    | 侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)                                |
| 反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析 .....                                                | 于皓, 王爱杰, 陈川(1190)                                       |
| 农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响 .....                                   | 胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)                            |
| 蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应 .....                                  | 林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)                           |
| 有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究 .....                         | 周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)              |
| 新建核电站风险信息沟通实证研究 .....                                                     | 贺桂珍, 吕永龙(1218)                                          |
| 《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)     |                                                         |

# 乙酸/丙酸作为 EBPR 碳源的动力学模型研究 (I)——模型的建立

张超<sup>1,2</sup>, 陈银广<sup>2</sup>

(1. 石油化工科学研究院, 中国石化水处理中心, 北京 100083; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 以活性污泥 ASM2 模型为基础, 采用混合短链脂肪酸 (SCFAs) 作为基准物质, 建立了增强生物除磷系统中聚磷菌和 (PAO) 的厌氧/好氧动力学模型. 模型的显著特点是厌氧代谢过程中的糖原水解、聚羟基烷酸合成、以及聚磷水解速率由 SCFAs 的速率方程表示, 并考虑了厌氧维持对动力学和计量学的影响. 模型建立了过程计量学系数矩阵, 包括 3 个溶解性组分、4 个颗粒性组分, 同时考虑了 pH 对代谢动力学的影响. 最后, 在 PAO 模型的基础上, 建立了 GAO 的动力学模型, 该模型包含 7 个过程, 磷的浓度仅对其好氧生长有影响.

**关键词:** 增强生物除磷; 聚磷菌; 聚糖菌; 短链脂肪酸; 动力学模型

中图分类号: X11 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2013) 03-0993-05

## Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I): Model Constitution

ZHANG Chao<sup>1,2</sup>, CHEN Yin-guang<sup>2</sup>

(1. Water Treatment Center of SINOPEC, Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on activated sludge model No. 2 (ASM2), the anaerobic/aerobic kinetic model of phosphorus-accumulating organisms (PAO) was established with mixed short-chain fatty acids (SCFAs) as the base substance in enhanced biological phosphorus removal process. The characteristic of the PAO model was that the anaerobic metabolism rates of glycogen degradation, poly- $\beta$ -hydroxyalkanoates synthesis and polyphosphate hydrolysis were expressed by SCFAs uptake equation, and the effects of anaerobic maintenance on kinetics and stoichiometry were considered. The PAO kinetic model was composed of 3 soluble components, 4 particulate components and a pH parameter, which constituted the matrix of stoichiometric coefficients. On the basis of PAO model, the GAO kinetic model was established, which included 7 processes, and phosphorus content influenced the aerobic metabolism only.

**Key words:** enhanced biological phosphorus removal (EBPR); phosphorus-accumulating organisms (PAO); glycogen-accumulating organisms (GAO); short-chain fatty acids (SCFAs); kinetic model

增强生物除磷 (enhanced biological phosphorus removal, EBPR) 工艺可以有效降低废水中的磷含量, 是防治水体富营养化的重要途径之一. EBPR 中的聚磷菌 (phosphorus accumulating organisms, PAO) 在厌氧阶段释放磷, 并在好氧阶段吸收更多的磷, 通过排泥可达到去除污水中磷的目的.

然而在某些情况下, 即使外界条件似乎有利于 PAO 的生长, 但是 EBPR 的除磷功能却恶化甚至完全丧失, 这主要是因为聚糖菌 (glycogen accumulating organisms, GAO) 过度繁殖的结果. 因此, 抑制 GAO 的生长并使 PAO 取得竞争优势地位, 从而提高 EBPR 的除磷效率和稳定性具有重要的意义.

在课题组前期的研究中, 建立了增强生物除磷系统内 PAO 和 GAO 代谢过程中各物质之间的化学

计量关系<sup>[1]</sup>. 然而, 为了预测 EBPR 中 PAO 和 GAO 的竞争关系, 需要从动力学的角度进行解释. 乙酸和丙酸是废水中最主要的短链脂肪酸 (short-chain fatty acids, SCFAs), 例如 Von Muench<sup>[2]</sup> 调查了加拿大和澳大利亚 4 个大型水厂, 结果表明乙酸、丙酸分别占进水总有机酸的 49% ~ 71% 和 24% ~ 33%, 这些系统中丙酸和乙酸的 C-mol 比在 0.141 ~ 0.182 之间; Naik<sup>[3]</sup> 和 Shah<sup>[4]</sup> 对佛罗里达的 Bardenpho 水厂监测得出丙酸和乙酸的 C-mol 比为 0.28 ~ 0.75.

收稿日期: 2012-06-01; 修订日期: 2012-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50408039); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA06Z326); 中国石化基础科研项目 (311047)

作者简介: 张超 (1981 ~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为废水生物处理与污泥资源化, E-mail: zhangchao\_seu@163.com

尽管如此,对混合碳源条件下 PAO 和 GAO 的动力学模拟的研究非常少. 本研究旨在活性污泥 ASM2 模型的基础上,分别建立以乙酸和丙酸作为混合碳源的 PAO 和 GAO 动力学方程,以期 EBPR 的稳定运行提供理论指导.

## 1 活性污泥 ASM2 模型回顾

### 1.1 PAO 和 GAO 的代谢过程

在厌氧条件下<sup>[5,6]</sup>,聚磷菌吸收污水中的易降解有机物如 SCFAs,并将其储存为贮能物质聚羟基烷酸(poly-hydroxyalkanoates, PHA),这个过程能量主要来源于聚磷(Poly-P)的水解;同时,细胞内的糖原(glycogen)也发生水解,提供了另外一小部分能量以及合成 PHA 所需要的全部还原力  $\text{NADH}_2$ .

在好氧条件下<sup>[5,6]</sup>,PAO 以游离氧为电子受体,氧化厌氧下储存的 PHA,并利用该反应提供的:①好氧吸磷所必须的能量,②还原力,③维持细胞生长的能量,合成糖原并从污水中过量吸取磷酸盐作为能量储存在体内,同时产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ .

在厌氧条件下,GAO 分解体内的糖原产生整个过程中所需要的能量和  $\text{NADH}_2$ ,用于吸收污水中短链脂肪酸等易降解有机物,并合成 PHA 贮存在体内. 在好氧条件下,聚糖菌氧化厌氧条件下贮存的 PHA,用于维持细胞生长并补充前一阶段消耗的糖原. 在 GAO 的整个代谢过程中,除了微生物的生长之外,没有磷的释放和吸收.

### 1.2 ASM2 模型分析

在 ASM2 模型建立时<sup>[7,8]</sup>,虽然已经发现糖原重要的碳源储存物质,但是为了简化模型,在 ASM2 模型中没有予以考虑糖原的作用. 为了模拟 PAO 和 GAO 的厌氧/好氧代谢过程,Manga 等<sup>[9]</sup>将糖原作为单一组分在模型中列出,并被广泛引用<sup>[10~17]</sup>;该模型以 PHA 作为基准物质,PAO 胞内外物质的厌氧代谢围绕 PHA 的代谢过程和反应速率展开. 根据 Manga 等<sup>[9]</sup>模型中物质的转化关系,对 PHA 厌氧合成积分,然后对 SCFAs 吸收和糖原水解积分并相加,得到积分等式(1):

$$\int \frac{dX_{\text{PHA}}}{dt} dt = - \left( \int \frac{dS_{\text{SCFAs}}}{dt} dt + \int \frac{dX_{\text{GLY}}}{dt} dt \right) \quad (1)$$

式(1)的物理意义为:PAO 在厌氧吸收的 SCFAs 和分解的糖原,被完全转化为 PHA. 但是,在实际的厌氧过程中,PAO 在吸收 SCFAs 时,糖原经由 Entner-Doudoroff 途径水解,在这个过程中,吸收

的 SCFAs 和水解的糖原一部分用于合成 PHA,还有一部分碳转化为  $\text{CO}_2$ ,由此可见,式(1)所谓的平衡并不成立. 为了准确描述 PAO 厌氧动力学过程,本研究以 SCFAs 作为基准物质推导出系列动力学方程.

## 2 PAO 厌氧动力学模型

### 2.1 SCFAs 的厌氧吸收

PAO 厌氧吸收 SCFAs 的速率与 PAO 胞内的聚磷浓度( $X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}}$ )和糖原浓度( $X_{\text{GLY}}/X_{\text{PAO}}$ )有关,当聚磷和糖原浓度足够高时,PAO 吸收 SCFAs 的速率  $q_{\text{SCFAs}}$  不受它们的影响,当聚磷和糖原下降到一定浓度后,SCFAs 的吸收受到抑制. 课题组还发现,在厌氧初始阶段,SCFAs 的吸收呈零级动力学,即与 SCFAs 浓度无关;但是在试验后期,SCFAs 的吸收速率快速下降<sup>[1]</sup>,因此,式(2)包含了开关系数  $K_{\text{SCFAs}}$ :

$$\frac{dS_{\text{SCFAs}}}{dt} = - q_{\text{SCFAs}} \frac{S_{\text{SCFAs}}}{K_{\text{SCFAs}} + S_{\text{SCFAs}}} \cdot \frac{X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{PP}} + X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}}} \cdot \frac{X_{\text{GLY}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{GLY}} + X_{\text{GLY}}/X_{\text{PAO}}} X_{\text{PAO}} \quad (2)$$

### 2.2 糖原水解

PAO 吸收单位 SCFAs,有  $Y_{\text{GLY}}^{\text{SCFAs}}$  的糖原水解提供代谢所需的还原力:

$$\frac{dX_{\text{GLY}}}{dt} = Y_{\text{GLY}}^{\text{SCFAs}} \frac{dS_{\text{SCFAs}}}{dt} \quad (3)$$

### 2.3 聚磷水解用于 SCFAs 吸收和厌氧维持

由文献[1]可知,厌氧过程中水解的聚磷大部分用于吸收 SCFAs,还有一部分用于厌氧维持:

$$\frac{dX_{\text{PP}}}{dt} = Y_{\text{SOP}}^{\text{SCFAs}} \frac{dS_{\text{SCFAs}}}{dt} - m_{\text{PAO}}^{\text{Anaerobic}} X_{\text{PAO}} \quad (4)$$

相应地,释磷速率可以表示为:

$$\frac{dS_{\text{SOP}}}{dt} = - Y_{\text{SOP}}^{\text{SCFAs}} \frac{dS_{\text{SCFAs}}}{dt} + m_{\text{PAO}}^{\text{Anaerobic}} X_{\text{PAO}} \quad (5)$$

### 2.4 PHA 合成

$$\frac{dX_{\text{PHA}}}{dt} = - Y_{\text{PHA}}^{\text{SCFAs}} \frac{dS_{\text{SCFAs}}}{dt} \quad (6)$$

## 3 PAO 动力学模型的描述

### 3.1 模型组分

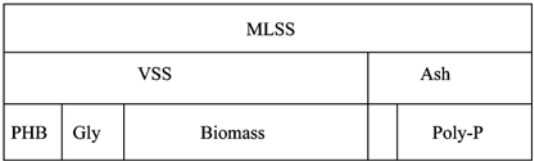
和大多数污泥模型一样<sup>[7,16,18~20]</sup>,为了保持模型的一致性,本研究的厌氧/好氧动力学模型仍然采用 ASM2 的表达方式. 在本动力学模型中,假设氨氮和碱度足够高,不是模型的限制性因素,它们对

PAO 代谢的影响可以忽略. 模型所包含的组分如表 1 所示.

需要指出的是, ASM2 模型的计量基准单位为 COD. 为了与 ASM2 模型保持一致, 同时方便模型的后续使用, 依然采用 COD 作为计量单位. 此外, 如图 1 所示, 表 1 中的  $X_{\text{PAO}}$  不包括  $X_{\text{PP}}$ 、 $X_{\text{PHA}}$  和  $X_{\text{GLY}}$ , 即贮存产物  $X_{\text{PP}}$ 、 $X_{\text{PHA}}$ 、 $X_{\text{GLY}}$  和  $X_{\text{PAO}}$  是分开考虑的, 因此, 在接下来的动力学中, 这 3 种组分分别对应于不同的衰减过程.

3.2 模型矩阵与过程速率

PAO 的化学计量矩阵与过程速率均采用 ASM2 模型的表达方式, 计量学矩阵和过程速率如表 2 和表 3 所示.



GAO 与之类似, 但是不包含聚磷

图 1 PAO 的组成示意

Fig. 1 Schematic drawing of the composition of PAO

表 1 PAO 和 GAO 动力学模型组分

Table 1 Definition of components in the kinetic model for PAO and GAO

| 组分    | 序号    | PAO 模型组分            | GAO 模型组分            | 单位                             | 意义                       |
|-------|-------|---------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 溶解性组分 | 1     | $S_{\text{SCFAs}}$  | $S_{\text{SCFAs}}$  | $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | 溶液中的短链脂肪酸(以 COD 计)       |
|       | 2     | $S_{\text{SOP}}$    | $S_{\text{SOP}}$    | $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | 溶液中的磷酸盐(以 P 计)           |
|       | 3     | $S_{\text{O}_2}$    | $S_{\text{O}_2}$    | $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | 溶解氧(以 $\text{O}_2$ 计)    |
| 颗粒性组分 | 4, 5  | $X_{\text{PHA, P}}$ | $X_{\text{PHA, G}}$ | $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | PAO(GAO)贮存的 PHA(以 COD 计) |
|       | 6, 7  | $X_{\text{GLY, P}}$ | $X_{\text{GLY, G}}$ | $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | PAO(GAO)贮存的糖原(以 COD 计)   |
|       | 8     | $X_{\text{PP}}$     | —                   | $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | PAO 贮存的聚磷酸盐(以 P 计)       |
|       | 9, 10 | $X_{\text{PAO}}$    | $X_{\text{GAO}}$    | $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | 聚磷菌(聚糖菌)浓度(以 COD 计)      |
| 其它组分  | 11    | pH                  | —                   | —                              | PAO 系统好氧阶段 pH 值          |

表 2 PAO 的过程计量学系数矩阵

Table 2 Matrix of the stoichiometric coefficients for PAO metabolic model

| 序号 | 反应过程                      | $S_{\text{SCFAs}}$ | $S_{\text{SOP}}$                | $X_{\text{PHA, P}}$             | $X_{\text{GLY, P}}$              | $X_{\text{PP}}$                  | $X_{\text{PAO}}$ |
|----|---------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|
| 1  | $S_{\text{SCFAs}}$ 的厌氧吸收  | -1                 | $Y_{\text{SOP}}^{\text{SCFAs}}$ | $Y_{\text{PHA}}^{\text{SCFAs}}$ | $-Y_{\text{GLY}}^{\text{SCFAs}}$ | $-Y_{\text{SOP}}^{\text{SCFAs}}$ |                  |
| 2  | $X_{\text{PP}}$ 用于厌氧维持    |                    | 1                               |                                 |                                  | -1                               |                  |
| 3  | $X_{\text{PP}}$ 的好氧贮存     |                    | -1                              | $-Y_{\text{PHA}}$               |                                  | 1                                |                  |
| 4  | $X_{\text{GLY, P}}$ 的好氧贮存 |                    |                                 | $-\frac{1}{Y_{\text{GLY}}}$     | 1                                |                                  |                  |
| 5  | $X_{\text{PAO}}$ 的好氧生长    |                    | $-i_{\text{PBM}}$               | $-\frac{1}{Y_{\text{PAO}}}$     |                                  |                                  | 1                |
| 6  | $X_{\text{PAO}}$ 的好氧水解    |                    | $i_{\text{PBM}}$                |                                 |                                  |                                  | -1               |
| 7  | $X_{\text{PP}}$ 的好氧水解     |                    | 1                               |                                 |                                  | -1                               |                  |
| 8  | $X_{\text{GLY, P}}$ 的好氧水解 | 1                  |                                 |                                 | -1                               |                                  |                  |
| 9  | $X_{\text{PHA, P}}$ 的好氧水解 | 1                  |                                 | -1                              |                                  |                                  |                  |

表 3 PAO 动力学模型的过程速率

Table 3 Process reaction rate equations for PAO

| 序号 | 反应过程                      | 过程速率表达式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | $S_{\text{SCFAs}}$ 的厌氧吸收  | $q_{\text{SCFAs}} \frac{S_{\text{SCFAs}}}{K_{\text{SCFAs}} + S_{\text{SCFAs}}} \cdot \frac{X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{PP}} + X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}}} \cdot \frac{X_{\text{GLY, P}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{GLY}} + X_{\text{GLY, P}}/X_{\text{PAO}}} X_{\text{PAO}}$                                                                                                                                    |
| 2  | $X_{\text{PP}}$ 用于厌氧维持    | $m_{\text{PAO}}^{\text{Anaerobic}} X_{\text{PAO}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 3  | $X_{\text{PP}}$ 的好氧贮存     | $q_{\text{PP}} \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{SOP}}}{K_{\text{PS}} + S_{\text{SOP}}} \cdot \frac{X_{\text{PHA, P}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{PHA-PP}} + X_{\text{PHA, P}}/X_{\text{PAO}}} \cdot \frac{(f_{\text{PP}}^{\text{Max}} - X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}})}{K_{\text{IPP}} + (f_{\text{PP}}^{\text{Max}} - X_{\text{PP}}/X_{\text{PAO}})} X_{\text{PAO}} I_{\text{pH}}$ |
| 4  | $X_{\text{GLY, P}}$ 的好氧贮存 | $q_{\text{GLY}} \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{f_{\text{GLY}}^{\text{Max}} - X_{\text{GLY, P}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{IG}} + (f_{\text{GLY}}^{\text{Max}} - X_{\text{GLY, P}}/X_{\text{PAO}})} \cdot \frac{X_{\text{PHA, P}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{PHA-GLY}} + X_{\text{PHA, P}}/X_{\text{PAO}}} X_{\text{PAO}} I_{\text{pH}}$                                                    |
| 5  | $X_{\text{PAO}}$ 的好氧生长    | $\mu_{\text{PAO}} \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{SOP}}}{K_{\text{P}} + S_{\text{SOP}}} \cdot \frac{X_{\text{PHA, P}}/X_{\text{PAO}}}{K_{\text{PHA}} + X_{\text{PHA, P}}/X_{\text{PAO}}} X_{\text{PAO}} I_{\text{pH}}$                                                                                                                                                         |
| 6  | $X_{\text{PAO}}$ 的好氧水解    | $b_{\text{PAO}} X_{\text{PAO}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 7  | $X_{\text{PP}}$ 的好氧水解     | $b_{\text{PP}} X_{\text{PP}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 8  | $X_{\text{GLY, P}}$ 的好氧水解 | $b_{\text{GLY}} X_{\text{GLY, P}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 9  | $X_{\text{PHA, P}}$ 的好氧水解 | $b_{\text{PHA}} X_{\text{PHA, P}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

研究表明,pH 对 PAO 的好氧代谢有重要的影响:在 pH < 7.5 时,PAO 的吸磷速率、PHA 降解速率、糖原合成速率随着 pH 的升高而增加,但是,当 pH > 7.5 时,PAO 的代谢速率反而下降<sup>[21, 22]</sup>. 此外,Tan 等<sup>[23]</sup>发现微生物的比生长速率( $\mu$ )也受 pH 的影响,在中性 pH 附近, $\mu$  最大,pH 升高或降低都对  $\mu$  产生不利影响. 因此,PAO 动力学模型考虑了好氧条件下 pH 的抑制系数  $I_{\text{pH}}$ <sup>[24, 25]</sup>:

$$I_{\text{pH}} = \frac{f_{\text{pH}}}{f_{\text{pH}_{\text{opt}}}} = \frac{\frac{10^{-\text{pH}}}{K_{\text{pH}} + 10^{-\text{pH}}} \cdot \frac{K_{\text{I,pH}}}{K_{\text{I,pH}} + 10^{-\text{pH}}}}{\frac{10^{-\text{pH}_{\text{opt}}}}{K_{\text{pH}} + 10^{-\text{pH}_{\text{opt}}}} \cdot \frac{K_{\text{I,pH}}}{K_{\text{I,pH}} + 10^{-\text{pH}_{\text{opt}}}}}$$

(7)

表 4 GAO 的过程计量学系数矩阵

Table 4 Matrix of the stoichiometric coefficients for GAO metabolic model

| 序号 | 反应过程                       | $S_{\text{SCFAs}}$ | $S_{\text{SOP}}$  | $X_{\text{PHA, G}}$             | $X_{\text{GLY, G}}$              | $X_{\text{GAO}}$ |
|----|----------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------|
| 1  | $S_{\text{SCFAs}}$ 的厌氧吸收   | -1                 |                   | $Y_{\text{PHA}}^{\text{SCFAs}}$ | $-Y_{\text{GLY}}^{\text{SCFAs}}$ |                  |
| 2  | $X_{\text{GLY, G}}$ 用于厌氧维持 |                    |                   |                                 | -1                               |                  |
| 3  | $X_{\text{GLY, G}}$ 的好氧贮存  |                    |                   | $-\frac{1}{Y_{\text{GLY}}}$     | 1                                |                  |
| 4  | $X_{\text{GAO}}$ 的好氧生长     |                    | $-i_{\text{PBM}}$ | $-\frac{1}{Y_{\text{GAO}}}$     |                                  | 1                |
| 5  | $X_{\text{GAO}}$ 的好氧水解     |                    | $i_{\text{PBM}}$  |                                 |                                  | -1               |
| 6  | $X_{\text{GLY, G}}$ 的好氧水解  | 1                  |                   |                                 | -1                               |                  |
| 7  | $X_{\text{PHA, G}}$ 的好氧水解  | 1                  |                   | -1                              |                                  |                  |

表 5 GAO 动力学模型的过程速率

Table 5 Process reaction rate equations for GAO

| 序号 | 反应过程                       | 过程速率表达式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | $S_{\text{SCFAs}}$ 的厌氧吸收   | $q_{\text{SCFAs}} \frac{S_{\text{SCFAs}}}{K_{\text{SCFAs}} + S_{\text{SCFAs}}} \cdot \frac{X_{\text{GLY, G}}/X_{\text{GAO}}}{K_{\text{GLY}} + X_{\text{GLY, G}}/X_{\text{GAO}}} X_{\text{GAO}}$                                                                                                                                                           |
| 2  | $X_{\text{GLY, G}}$ 用于厌氧水解 | $m_{\text{GAO}}^{\text{Anaerobic}} X_{\text{GAO}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3  | $X_{\text{GLY, G}}$ 的好氧贮存  | $q_{\text{GLY}} \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{f_{\text{GLY}}^{\text{Max}} - X_{\text{GLY, G}}/X_{\text{GAO}}}{K_{\text{IG}} + (f_{\text{GLY}}^{\text{Max}} - X_{\text{GLY, G}}/X_{\text{GAO}})} \cdot \frac{X_{\text{PHA, G}}/X_{\text{GAO}}}{K_{\text{PHA-GLY}} + X_{\text{PHA, G}}/X_{\text{GAO}}} X_{\text{GAO}}$ |
| 4  | $X_{\text{GAO}}$ 的好氧生长     | $\mu_{\text{GAO}} \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{SOP}}}{K_{\text{P}} + S_{\text{SOP}}} \cdot \frac{X_{\text{PHA, G}}/X_{\text{GAO}}}{K_{\text{PHA}} + X_{\text{PHA, G}}/X_{\text{GAO}}} X_{\text{GAO}}$                                                                                                      |
| 5  | $X_{\text{GAO}}$ 的好氧水解     | $b_{\text{GAO}} X_{\text{GAO}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 6  | $X_{\text{GLY, G}}$ 的好氧水解  | $b_{\text{GLY}} X_{\text{GLY, G}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 7  | $X_{\text{PHA, G}}$ 的好氧水解  | $b_{\text{PHA}} X_{\text{PHA, G}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

5 结论

(1)在活性污泥 ASM2 模型的基础上,推导了以混合短链脂肪酸作为基准物质的 PAO 厌氧和好氧动力学模型,确定了模型组分、过程计量学系数矩阵和过程速率表达式.

(2)在 PAO 动力学模型中,糖原水解、聚磷水

式中, $K_{\text{pH}}$  和  $K_{\text{I, pH}}$  分别为 pH 的饱和常数和抑制常数.  $\text{pH}_{\text{opt}}$  为最佳 pH 值,在该 pH 下,  $I_{\text{pH}} = 1$ , 没有抑制作用; 当 pH 低于或高于  $\text{pH}_{\text{opt}}$ ,  $I_{\text{pH}} < 1$  即产生抑制作用. 通过微分可得  $\text{pH}_{\text{opt}} = -\lg(\sqrt{K_{\text{pH}} \cdot K_{\text{I, pH}}})$ .

4 GAO 动力学模型

GAO 厌氧动力学模型与 PAO 厌氧动力学模型十分相似,但是在整个厌氧-好氧代谢过程中没有聚磷的合成与分解. 另外,与 PAO 不同,研究人员发现 GAO 的好氧代谢不受外界 pH 的影响<sup>[22]</sup>, 因此,在 GAO 的好氧代谢中,不包含抑制系数  $I_{\text{pH}}$ . GAO 动力学模型的系数矩阵以及过程速率表达式如表 4 和表 5 所示.

解、PHA 合成等过程速率可以用 SCFAs 的过程速率表示,并考虑了厌氧维持对磷释放的影响;将 pH 作为一个独立变量耦合到 PAO 的好氧代谢过程,直接体现 pH 对生物反应过程速率和代谢计量学的影响.

(3)在 PAO 动力学模型的基础上,建立了 GAO 好氧代谢和厌氧代谢的动力学模型,在 GAO 的好氧

动力学中不需考虑 pH 的影响。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Zhang C, Chen Y G, Randall A A, *et al.* Anaerobic metabolic models for phosphorus-and glycogen-accumulating organisms with mixed acetic and propionic acids as carbon sources[J]. *Water Research*, 2008, **42**(14): 3745-3756.
- [ 2 ] Von Muench. El DSP prefermenter technology book [ M ]. Australia, Brisbane Old: Science Traveller International CRC WMPCLtd, 1998.
- [ 3 ] Naik R V. Enhancement of denitrification using prefermenters in biological nutrient removal systems[D]. Orlando, FL: University of Central Florida, Orlando, FL, 1999.
- [ 4 ] Shah R R. Study of the performance of biological nutrient removal systems with and without prefermenters [ D ]. Orlando, FL: University of Central Florida, 2001.
- [ 5 ] 张超, 陈银广. 增强生物除磷系统中微生物及其代谢机制研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(10): 81-85.
- [ 6 ] Liu Y, Chen Y, Zhou Q. Effect of initial pH control on enhanced biological phosphorus removal from wastewater containing acetic and propionic acids [ J ]. *Chemosphere*, 2007, **66**(1): 123-129.
- [ 7 ] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 2, IAWQ Scientific and technical report[R]. London: IAWQ, 1995.
- [ 8 ] 张亚雷, 李咏梅. 活性污泥数学模型[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [ 9 ] Manga J, Ferrer J, Garcia-Usach F, *et al.* A modification to the activated sludge model No. 2 based on the competition between phosphorus - accumulating organisms and glycogen - accumulating organisms [ J ]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(11): 161-171.
- [ 10 ] Yagci N, Insel G, Artan N, *et al.* Modelling and calibration of phosphate and glycogen accumulating organism competition for acetate uptake in a sequencing batch reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(6): 241-250.
- [ 11 ] Yagci N, Insel G, Tasli R, *et al.* A new interpretation of ASM2d for modeling of SBR performance for enhanced biological phosphorus removal under different P/HAc ratios [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **93**(2): 258-270.
- [ 12 ] Whang L M, Park J K. Competition between polyphosphate-and glycogen-accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems; effect of temperature and sludge age [ J ]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(1): 4-11.
- [ 13 ] Whang L M, Filipe C D M, Park J K. Model-based evaluation of competition between polyphosphate-and glycogen-accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2007, **41**(6): 1312-1324.
- [ 14 ] Bucci V, Majed N, Hellweger F L, *et al.* Heterogeneity of intracellular polymer storage states in Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR) - observation and modeling[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(6): 3244-3252.
- [ 15 ] Yagci N, Dulekgurgen E, Artan N, *et al.* Experimental evaluation and model assessment of coexistence of PAOs and GAOs[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/hazardous Substance and Environmental Engineering*, 2011, **46**(9): 968-979.
- [ 16 ] Hao X, Wang Q, Cao Y, *et al.* Experimental evaluation of decrease in the activities of polyphosphate/glycogen-accumulating organisms due to cell death and activity decay inactivated sludge [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2010, **106**(3): 399-407.
- [ 17 ] Lopez-Vazquez C M, Oehmen A, Hooijmans C M, *et al.* Modeling the PAO-GAO competition: Effects of carbon source, pH and temperature[J]. *Water Research*, 2009, **43**(2): 450-469.
- [ 18 ] Sun P, Wang R Y, Fang Z G. Fully coupled activated sludge model (FCASM): Model development [ J ]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(20): 4632-4641.
- [ 19 ] Pai T Y, Chang H Y, Wan T J, *et al.* Using an extended activated sludge model to simulate nitrite and nitrate variations in TNCU2 process[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, **33**(11): 4259-4268.
- [ 20 ] Hao X D, Wang Q L, Cao Y L, *et al.* Evaluating sludge minimization caused by predation and viral infection based on the extended activated sludge model No. 2d[J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5130-5140.
- [ 21 ] Zhang C, Chen Y G, Liu Y. The long-term effect of initial pH control on the enrichment culture of phosphorus-and glycogen-accumulating organisms with a mixture of propionic and acetic acids as carbon sources [ J ]. *Chemosphere*, 2007, **69**(11): 1713-1721.
- [ 22 ] Filipe C D M, Daigger G T, Grady C P L Jr. Effects of pH on the rates of aerobic metabolism of phosphate-accumulating and glycogen-accumulating organisms [ J ]. *Water Environment Research*, 2001, **73**(2): 213-222.
- [ 23 ] Tan Y, Wang Z X, Marshall K C. Modeling pH effects on microbial growth: a statistical thermodynamic approach [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1998, **59**(6): 724-731.
- [ 24 ] Serralta J, Ferrer J, Borrás L, *et al.* An extension of ASM2d including pH calculation[J]. *Water Research*, 2004, **38**(19): 4029-4038.
- [ 25 ] Serralta J, Ferrer J, Borrás L, *et al.* Effect of pH on the biological phosphorus uptake [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **95**(5): 875-882.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                      |                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Estimation of PM <sub>2.5</sub> over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network .....                                                  | GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> ( 817 )     |
| Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City .....                                                                                         | LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> ( 826 )     |
| Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta .....                                                          | PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> ( 835 )      |
| Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition .....                                                                              | LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> ( 842 )           |
| Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter .....                                                                        | HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng ( 849 )                         |
| Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010 .....                                                                          | LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong ( 857 )                         |
| Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay .....                                                          | ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> ( 864 )           |
| Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau .....                                                                              | WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> ( 874 )     |
| Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices ( BMPs ) in the Zhangweinan River Basin .....                                        | XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin ( 882 )                           |
| An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control .....                                                                                          | ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> ( 892 )                 |
| Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland .....                                                                                     | LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> ( 900 ) |
| Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater .....                                                                              | ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> ( 907 )      |
| Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier .....                                                                                                           | LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 914 )         |
| Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District .....                                                                                                     | LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> ( 919 )        |
| Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....                                                          | WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> ( 927 )  |
| Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses .....                                                                                          | SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> ( 933 )               |
| Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter .....                                                                              | LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> ( 943 )                   |
| Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment .....                                                      | FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> ( 950 )      |
| Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                    | YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> ( 955 )          |
| Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G .....                                                                                               | YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> ( 962 )          |
| Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater .....                                                           | YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> ( 968 )               |
| Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O <sub>3</sub> -BAF .....                                                          | YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> ( 974 )                |
| Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment .....                                                                                          | WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> ( 979 )     |
| Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow .....                                                  | NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> ( 986 )        |
| Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( I ) : Model Constitution .....                                     | ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 993 )                                  |
| Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( II ) : Process Simulation .....                                    | ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 998 )                                  |
| Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( III ) : Model Application .....                                    | ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 1004 )                                 |
| Comparative Study on Water-air CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China .....                                                  | LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> ( 1008 )               |
| Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes .....                                                                               | CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 1017 )    |
| Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau .....                                        | ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> ( 1026 )  |
| Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene .....                                                                   | JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> ( 1034 )       |
| History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay .....                                                                                                                | ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> ( 1044 )          |
| Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province .....                                            | ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> ( 1055 )      |
| Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island .....                                                                                      | CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> ( 1062 )  |
| Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City .....                                                     | LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> ( 1067 )  |
| Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City .....                   | LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 1076 )   |
| Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City .....                                                             | CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang ( 1086 )                      |
| Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China .....                                     | GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> ( 1094 )      |
| Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch .....                                                                                              | ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> ( 1101 )   |
| Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....   | SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> ( 1107 )           |
| Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors .....                                                                                                               | ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> ( 1114 )        |
| Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk .....                                   | MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> ( 1120 )  |
| Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China .....                                                               | HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 1129 )              |
| Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake .....                                                                                                          | MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> ( 1136 )            |
| Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone .....                                                                              | LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> ( 1142 )         |
| Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car .....                                                                            | TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> ( 1150 )        |
| Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production .....                                                                                                                     | MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 1156 )            |
| Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed .....                                                                                         | CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> ( 1161 )       |
| Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge .....                                                                | LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao ( 1166 )                       |
| Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand .....                                                                                                                                   | ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> ( 1174 )   |
| Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr <sup>6+</sup> .....                                                        | HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> ( 1181 )     |
| Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process .....                                                                                      | YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan ( 1190 )                            |
| Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting ..... | HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> ( 1196 ) |
| Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm ( <i>Eisenia fetida</i> ) .....                                                                                                | LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> ( 1204 )    |
| Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol .....                                        | ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> ( 1211 )              |
| Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant .....                                                                                                                  | HE Gui-zhen, LÜ Yong-long ( 1218 )                                  |



# 《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人