

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                  |                                                  |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 .....                                   | 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)                        |
| 乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 .....                             | 陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)                      |
| 典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 .....                               | 吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)             |
| 某焦化厂周边大气 PM <sub>10</sub> 重金属来源及健康风险评价 .....                     | 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)           |
| 基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 .....                             | 李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)           |
| 珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 .....                                         | 孙成玲, 谢绍东 (1250)                                  |
| 低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 .....                                        | 李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)         |
| 太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 .....                                         | 郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)                     |
| 一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 .....                              | 王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)                          |
| 外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 .....                                      | 傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)         |
| 基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 .....                                         | 孙法圣, 程品, 张博 (1285)                               |
| 重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 .....                                      | 杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)                        |
| 重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 .....                                    | 蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)                 |
| 苦草 ( <i>Vallisneria spiralis</i> ) 根系对沉积物中各形态磷的影响 .....          | 李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)               |
| 循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 .....                                           | 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)                    |
| 不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 .....                                         | 段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)                |
| 再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 .....                                | 黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)                    |
| 二级处理出水的 UV-TiO <sub>2</sub> 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验 .....              | 王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)                         |
| 水中 C <sub>60</sub> 纳米颗粒的稳定性研究 .....                              | 方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)                      |
| XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 .....                                 | 赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)               |
| 纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 .....                             | 付融冰 (1351)                                       |
| 共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 .....                                      | 王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)                            |
| 硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 .....                                     | 吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)                      |
| 基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 .....                                | 姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)                    |
| 模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 .....                                  | 陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)                               |
| 电活性生物膜介导 Cu <sup>2+</sup> 生物还原的试验研究 .....                        | 刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)                           |
| 模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 .....                                          | 程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)                    |
| 填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 .....                                      | 何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)                |
| 化学合成施氏矿物与 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 ..... | 王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)                   |
| 处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 .....                          | 杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)              |
| 剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究 .....                                 | 董慧岭, 季民 (1421)                                   |
| 锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 .....              | 晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)               |
| 1 株铁基自养反硝化菌的脱氮特性 .....                                           | 王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)              |
| 碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究 .....              | 徐冰洁, 高品, 薛昱, 何梦琦, 吴凡 (1443)                      |
| 利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 .....                       | 张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)           |
| 毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 .....                                  | 陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)                |
| 缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 .....                                     | 王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)               |
| 微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 .....                                      | 王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁娉娟 (1468)                          |
| 东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 .....                                      | 张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)                   |
| 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 .....                                         | 吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)               |
| 老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 .....                                       | 陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)                    |
| 土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 .....                                         | 赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)              |
| 藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 .....                                          | 柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)                   |
| 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 .....                                | 胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)                  |
| 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 .....                               | 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)           |
| 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 .....                                   | 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)        |
| 生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 .....                                        | 解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)           |
| 上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 .....                                       | 诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)                  |
| SDBS/Na <sup>+</sup> 对红壤胶体悬液稳定性的影响 .....                         | 唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)                      |
| 稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 .....                                      | 赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548) |
| 藻类水体 Cd <sup>2+</sup> 毒性快速监测新方法研究 .....                          | 段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)      |
| 用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 .....                                    | 龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)                         |
| Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 吸附性能的研究 ..... | 钟琼, 李欢 (1566)                                    |
| 污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 .....                                      | 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)                 |
| 城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 .....                                      | 杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)                          |
| 水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 .....                                       | 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)                 |
| 六价铬细菌还原的分子机制研究进展 .....                                           | 李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)               |
| 农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 .....                                   | 魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)                              |
| 《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)  |                                                  |

# 基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究

姜应和<sup>1,3</sup>, 刘佩炬<sup>1,3</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 田中凯<sup>2</sup>, 刘小英<sup>1,3\*</sup>

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉市城市排水发展有限公司, 武汉 430060; 3. 武汉理工大学城镇供水与水污染控制技术研究中心, 武汉 430070)

**摘要:** 通过建立 A<sup>2</sup>/O 工艺中氮的物料平衡方程, 预测不同进水 TN 条件下, 如何调控污泥回流比和混合液回流比使出水氮达到国家一级 A 标准; 然后根据预测的运行参数, 调试武汉市龙王嘴污水处理厂中试模拟装置, 进行工况验证. 结果表明, 在进水 TN 低于 30 mg·L<sup>-1</sup>, 温度高于 15℃ 时, 不需要混合液回流即可实现良好的脱氮效果; 在进水 TN 高于 30 mg·L<sup>-1</sup>, 温度在 10~15℃ 之间时, 增加混合液回流和 DO 可以提高脱氮效果, 但当温度远远低于 10℃ 时, 必须同时提高混合液回流比来保证系统出水. 该方法能较好依据水质状况通过调控回流比实现较好的脱氮效果.

**关键词:** 脱氮; 污泥回流比; 混合液回流比; 温度; 污泥浓度; 溶解氧

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1372-05 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.04.024

## Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance

JIANG Ying-he<sup>1,3</sup>, LIU Pei-ju<sup>1,3</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, TIAN Zhong-kai<sup>2</sup>, LIU Xiao-ying<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan City Drainage Development Limited Company, Wuhan 430060, China; 3. Research Center of Urban Water Supply and Contaminated Water Control Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** By building the mass balance of nitrogen in A<sup>2</sup>/O process, the nitrogen model which raised some strategies on how to control sludge return ratio and mixed liquid return ratio to make the effluent nitrogen achieve the national standard A under different influent total nitrogen (TN), was set up. And the presumed parameters were verified by the pilot test of the Wuhan's Longwangzui WWTP. The result showed that when the temperature and the TN were over 15℃ and below 30 mg·L<sup>-1</sup> respectively, the mixed liquid return ratio was 0. When the temperature was between 10℃ and 15℃ and TN was over 30 mg·L<sup>-1</sup>, higher MLSS and DO elevated N removal. When the temperature was far below 10℃, the mixed liquid return ratio was also at a higher level. Based on the Wuhan's Longwangzui WWTP influent water quality, measures of adjusting the return ratio were well adapted to obtain acceptable nitrogen effluent.

**Key words:** nitrogen removal; sludge return ratio; mixed liquid return ratio; temperature; MLSS; DO

目前,我国很多污水处理厂均采用 A<sup>2</sup>/O 工艺进行污水生物处理<sup>[1]</sup>. 但由于 A<sup>2</sup>/O 工艺自身存在碳源竞争、硝酸盐以及泥龄等问题使其在实际运行中很难实现高效同步脱氮除磷效果<sup>[2,3]</sup>. 为提高 A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮除磷效果,研究者提出倒置 A<sup>2</sup>/O、改良式 A<sup>2</sup>/O 等工艺,以及化学除磷、补充碳源、添加生物填料等辅助手段<sup>[4~7]</sup>. 对实际运行污水处理厂而言,通过投加混凝剂可迅速提高除磷效果,而脱氮仍是一个难题.

生物脱氮过程中需要自养菌和异养菌两类不同微生物参与,它们对有机物浓度、DO、pH 值要求均不同,导致在 A<sup>2</sup>/O 工艺实际运行过程中,污泥回流比、混合液回流比、进水水质、温度等因素对脱氮效果产生重要影响<sup>[8~11]</sup>. 为获得良好的脱氮效果,研究者从各种模型入手来调控污水厂的运行参

数<sup>[12,13]</sup>. 其中,最为著名的 IWA 模型较复杂,实际应用困难<sup>[14,15]</sup>. 因此,寻求一种快速、简便适用的手段是很多污水厂面临的实际问题.

本研究以武汉市龙王嘴污水处理厂实际处理工艺为原型建立中试装置,从氮平衡分析入手,采用理论分析与实际运行相结合的方式,分析不同进水条件下,如何调整污泥浓度、污泥回流比及混合液回流比来使出水 TN 达到一级 A 标准,以期为实际污水处理厂高效脱氮运行提供借鉴.

收稿日期: 2013-07-14; 修订日期: 2013-11-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-002-01-02); 国家自然科学基金项目(31270573); 中央高校基本科研业务费专项(2012-IV-072); 武汉市城市排水发展有限公司资助项目

作者简介: 姜应和(1964~),男,博士,教授,主要研究方向为水环境治理, E-mail: jyhe123@163.com

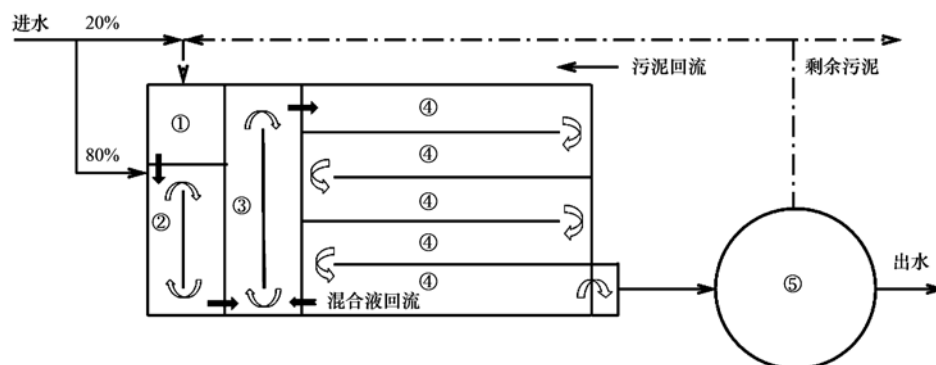
\* 通讯联系人, E-mail: xy2000225@sohu.com

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与运行参数

本试验所用中试装置以龙王嘴污水处理厂现有工艺为原型,原设计处理水量为  $24 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ . 反应器材

质为钢板,总容积为  $12.92 \text{ m}^3$ ,有效水深  $1.0 \text{ m}$ ,超高  $0.5 \text{ m}$ ,原设计选择池、厌氧池、缺氧池及好氧池 HRT 分别为  $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$  和  $5.5 \text{ h}$ . 本试验进水为设计处理水量的  $80\%$ ,其各部分的实际 HRT 见图 1 中说明.



①选择池(HRT=0.625 h); ②厌氧池(HRT=1.25 h); ③缺氧池(HRT=1.875 h); ④好氧池(HRT=6.875 h); ⑤二沉池(HRT=2.5 h)

图1 中试试验装置示意

Fig. 1 Schematics of the pilot test reactor

中试装置进水为龙王嘴污水处理厂涡流沉砂池出水,其中  $20\%$  进水与回流污泥混合进入选择池,将污泥中硝酸盐进行反硝化,另外  $80\%$  进水直接进入厌氧池,而混合液从好氧池第 4 个廊道末端回流至缺氧池. 好氧池采用渐减曝气方式,水温在  $15^\circ\text{C}$  以上时,末端 DO 平均值在  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右,水温在  $15^\circ\text{C}$  以下时,提高曝气强度,末端 DO 在  $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上.

### 1.2 试验水质

试验水质情况为  $\text{COD } 150 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{SS } 100 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N } 10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{TN } 20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{TP } 2 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH } 6 \sim 9$ .

### 1.3 试验方法

本研究在试验初期对  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺氮平衡建立理论模型,根据此模型调整相关的运行参数,使其在实际进水条件下出水 TN 达到一级 A 的标准<sup>[16]</sup>.

### 1.4 测试方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TN、COD、SV、MLSS、MLVSS 等均按标准方法测定<sup>[17]</sup>; DO 采用 HQ30 便携式溶解氧仪(HACH)测定.

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{A}^2/\text{O}$ 工艺氮平衡模型的建立

$\text{A}^2/\text{O}$  工艺中 N 的迁移转化途径如图 2 所示. 据此可建立 N 的物料平衡方程:

$$\text{进水 TN}(N_i) = \text{出水 TN}(N_1) + \text{脱氮池脱氮 TN}(N_2) + \text{剩余污泥排除 TN}(N_3) \quad (1)$$

为简化模型,作如下 7 点假设:

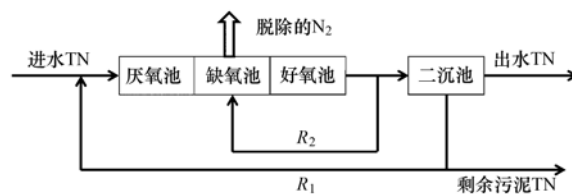


图2  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺氮物料平衡示意

Fig. 2 Schematic diagram of the  $\text{A}^2/\text{O}$  process nitrogen balance

(1) 进水 TN 在好氧区经充分氧化后几乎全部转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  一般小于  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 可取  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

(2) 好氧池中 MLVSS/MLSS 取值为  $0.5$ .

(3) 二沉池出水 SS 一般在  $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,通过出水 SS 去除的有机氮最小值可按  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \times 0.5 \times 0.12 = 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  计.

(4) 龙王嘴污水处理厂出水达到一级 A 标准,出水  $\text{TN} \leq 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

(5) 进水 TN 与进水 COD 同步增减,  $\text{TN} \leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,污泥龄  $\theta_c$  取  $25 \text{ d}$ ,进水  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \text{TN} < 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $\theta_c$  取  $15 \sim 20 \text{ d}$ ; 当进水  $\text{TN} \geq 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时(尤其当  $\text{TN} \geq 35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,此时进水温度较低,一般在  $15^\circ\text{C}$  以下,生物活性显著降低),  $\theta_c$  取  $20 \sim 25 \text{ d}$ .

(6) 脱氮碳源充足,缺氧池对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率高达  $90\%$  (但当进水  $\text{TN} \geq 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,一般处于

冬季,此时水温较低,反硝化去除率在 50% 以上),系统中不存在同步硝化反硝化作用。

(7)通过排出剩余污泥排出的 TN 主要指污泥中的有机氮,忽略剩余污泥排出的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

若生物池体积为  $V(\text{m}^3)$ ,设计处理水量为  $Q(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ ,污泥浓度为  $X(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ ,回流污泥浓度为

$X_R(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ ,污泥龄为  $\theta_c(\text{d})$ , $c$  为出水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),TN 为进水总氮含量,污泥回流比为  $R_1$ ,混合液回流比为  $R_2$ (见图 3), $r$  为缺氧池的反硝化去除率,进水中 TN 的含量  $N_i$  则可以得到:

$$N_i = Q \times \text{TN} \tag{2}$$

$$N_1 = Q \times (c + 1.6) \tag{3}$$

$$N_2 = (R_1 + R_2)Q \times c \times r \tag{4}$$

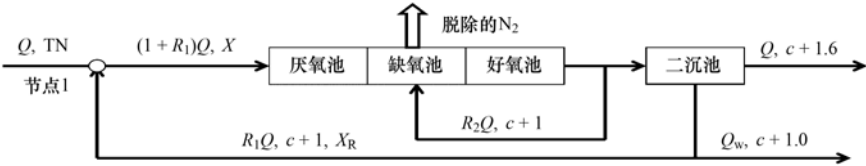


图 3 A<sup>2</sup>/O工艺脱氮各单元参数示意

Fig. 3 Schematic diagram of each unit in the A<sup>2</sup>/O process nitrogen removal

剩余污泥量为:

$$\Delta X = \frac{VX}{\theta_c}, \Delta X_v = 0.5 \times \frac{VX}{\theta_c} \tag{5}$$

生物池水力停留时间延长至 10.6 h,即 0.44 d (见图 1),通过剩余污泥排放的有机氮为:

$$N_{3-1} = 0.12\Delta X_v = 0.026QX/\theta_c \tag{6}$$

在图 3 所示节点 1 处存在以下生物量物料平衡关系式:

$$R_1QX_R = (1 + R_1)QX \tag{7}$$

由此推出:

$$X_R/X = (1 + R_1)/R_1 \tag{8}$$

剩余污泥的流量为:

$$Q_w = \frac{0.44QX}{\theta_c X_R} = \frac{0.44QR_1}{\theta_c(1 + R_1)} \tag{9}$$

通过排出剩余污泥所排出的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为:

$$N_{3-2} = Q_w(1.0 + c) \tag{10}$$

$Q_w \ll Q$ ,根据假设(7),可以得到下列关系:

$$N_3 \approx N_{3-1} \tag{11}$$

由式(2)~(4)、(6)和(10)得出:

$$\text{TN} = (c + 1.6) + (R_1 + R_2) \times c \times r + \frac{0.026 \times X}{\theta_c} \tag{12}$$

令  $R = R_1 + R_2$  为总回流比( $R \geq 0.5$ ),当  $R \leq 1$  时,此时  $R_1 = R, R_2 = 0$ ; 当  $R > 1$  时,此时  $R_1 = 100\%, R_2 = (R - 1)$ . 根据上述假定,在不同进水 TN、 $\theta_c$ 及反硝化去除率(50%~90%)作用下,计算在不同  $X$ (絮状污泥 MLSS 一般在 3 000~7 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间)时对应的  $R$  值(见表 1)。

表 1 不同运行参数时 R 值

Table 1 The R value under different running parameters

| TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $\theta_c/\text{d}$ | X/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ |           |           |           |           |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                   |                     | 3 000                            | 4 000     | 5 000     | 6 000     | 7 000     |
| $\leq 20$                         | 25                  | 0.19                             | 0.11      | 0.02      | —         | —         |
| 20~25                             | 20~25               | 0.19~0.56                        | 0.11~0.33 | 0.02~0.33 | 0~0.22    | 0~0.11    |
| 25~30                             | 15~20               | 0.56~1.57                        | 0.87~1.30 | 0.76~1.04 | 0.65~0.77 | 0.11~0.50 |
| 30~35                             | 20~25               | 1.89~2.66                        | 1.73~2.50 | 1.57~2.34 | 1.41~2.18 | 1.25~2.02 |
| 35~40                             | 25                  | 2.66~3.43                        | 2.50~3.27 | 2.34~3.11 | 2.18~2.95 | 2.02~2.79 |
| 40~45                             | 25                  | 3.43~4.20                        | 3.27~4.04 | 3.11~3.88 | 2.95~3.72 | 2.79~3.56 |
| 45~50                             | 25                  | 4.20~4.97                        | 4.04~4.81 | 3.88~4.65 | 3.72~4.49 | 3.56~4.33 |

根据表 1 并结合中试进水水质(TN 浓度)及调试运行方便,反应器可以按以下 4 个工况运行。

工况一:进水 TN 在 25  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,水温一般较高,此时可取 MLSS 在 3 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,污泥回流比为 50%,硝化液回流比为 0。

工况二:进水 TN 在 25~30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,水温一般

较高,此时可取 MLSS 在 4 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,污泥回流比 100%,硝化液回流比为 0。

工况三:进水 TN 在 30~35  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,水温一般较低,此时可取 MLSS 在 6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,污泥回流比 100%,硝化液回流比为 100%。

工况四:进水 TN 在 35  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上,水温偏低,

此时可取 MLSS 在  $7\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,污泥回流比 100%,硝化液回流比为 200% 或更高.

通过调试中试试验装置在 4 个工况下的运行状况,不仅可以验证脱氮模型假定和算法的合理性,更重要之处在于可以为龙王嘴污水处理厂在不同进水条件下提供合理最佳回流运行方案,达到稳定脱氮效果.

2.2 A<sup>2</sup>/O 工艺氮平衡模型的中试验证

2.2.1 工况一试验

2012 年 5 月 13 日~6 月 30 日和 2012 年 8 月 4 日~8 月 27 日期间,进水水质指标平均值如下: COD  $221.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , SS  $224.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN  $24.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (在  $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$   $14.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$   $1.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TP  $5.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水温  $23^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ . 该工况共运行 72 d, 运行参数为: 污泥回流比 50%, 生物反应池平均 MLSS 为  $3\,734\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , MLVSS/MLSS 比值约为 0.48, 污泥龄为 20.8 d.

在该工况下,出水 COD 和 SS 平均值分别为  $21.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $11.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别达到 89.6% 和 93.5%; 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均值为  $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率达到 96.9%, 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  相对较高, 平均值为  $11.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水 TN 平均值  $11.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 主要来自于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , 平均去除率达到 51.5%, 采样点达标率为 94.9%. 出水 TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  优于国家一级 A 的标准, 由此可见, 该工况下模型预测可靠有效.

2.2.2 工况二试验

2012 年 7 月 1 日~7 月 31 日期间,进水水质指标平均值如下: COD  $224.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN  $26.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$   $16.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$   $1.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,

TP  $5.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水温  $27^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ . 该工况共运行 31 d, 其运行参数为: 污泥回流比 100%, 生物反应池平均 MLSS 为  $4\,151\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , MLVSS/MLSS 比值约为 0.48, 污泥龄为 15.6 d.

在该工况下,出水 COD 平均值为  $21.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率达到 90.4%; 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均值  $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率达到 98.4%, 优于国家一级 A 的标准; 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  相对较高, 平均值为  $10.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 出水 TN 平均值  $10.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 主要来自于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , 平均去除率达到 57.9%, TN 达标率为 100%, 优于国家一级 A 的标准. 由此可见, 该工况下模型预测也可靠有效.

2.2.3 工况三试验

2012 年 10 月 19 日~2013 年 1 月 16 日期间,进水水质指标平均值如下: COD  $275.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , SS  $265.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN  $34.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$   $16.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$   $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TP  $5.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水温  $5\sim 15^\circ\text{C}$  之间. 该工况共运行 90 d, 其运行参数为: 污泥回流比 100%, 混合液回流比 100%, 生物反应池平均 MLSS 为  $7\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , MLVSS/MLSS 比值约为 0.48, 污泥龄为 23.5 d.

运行过程中为保证系统脱氮效果,在不同温度下及时调控 MLSS, 试验调整情况及平均进水水质详见表 2 和表 3.

表 2 取样序号与工况运行参数

| Table 2 Sample number and running parameters at working condition |                    |                                     |                      |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 取样次数                                                              | 时间                 | MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 水温/ $^\circ\text{C}$ |
| 1~25                                                              | 10 月 23 日~12 月 6 日 | 4 558                               | 14                   |
| 26~35                                                             | 12 月 7 日~12 月 25 日 | 6 110                               | 10                   |
| 36~44                                                             | 12 月 26 日~1 月 10 日 | 7 016                               | 7                    |
| 45~49                                                             | 1 月 11 日~1 月 17 日  | 7 393                               | 9                    |

表 3 中试装置出水指标值

| Table 3 Effluent of the pilot test |       |      |                                 |                                 |      |      |      |           |
|------------------------------------|-------|------|---------------------------------|---------------------------------|------|------|------|-----------|
| 取样次数                               | 项目    | COD  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | TN   | TP   | SS   | TN 达标效率/% |
| 1 ~ 25                             | 进水    | 230  | 14.7                            | 1.5                             | 32.0 | 5.0  | 244  | 52        |
|                                    | 出水    | 26   | 1.8                             | 11.5                            | 15.5 | 0.9  | 13   |           |
|                                    | 去除率/% | 88.5 | 87.8                            | —                               | 51.6 | 81.9 | 94.5 |           |
| 26 ~ 35                            | 进水    | 280  | 18.6                            | 0.8                             | 34.1 | 4.4  | 224  | 100       |
|                                    | 出水    | 24   | 0.7                             | 13.4                            | 14.4 | 1.3  | 13   |           |
|                                    | 去除率/% | 91.3 | 96.5                            | —                               | 57.9 | 69.7 | 94.2 |           |
| 36 ~ 44                            | 进水    | 340  | 17.0                            | 0.6                             | 37.3 | 5.3  | 291  | 67        |
|                                    | 出水    | 24   | 0.6                             | 12.5                            | 16.5 | 0.9  | 12   |           |
|                                    | 去除率/% | 92.9 | 96.3                            | —                               | 55.8 | 83.4 | 96.0 |           |
| 45 ~ 49                            | 进水    | 366  | 17.4                            | 0.3                             | 38.7 | 6.1  | 400  | 100       |
|                                    | 出水    | 30   | 0.3                             | 9.0                             | 10.2 | 0.6  | 20   |           |
|                                    | 去除率/% | 91.7 | 98.3                            | —                               | 73.6 | 90.9 | 95.0 |           |

该工况运行期间,出水 COD 和 SS 平均值分别为  $26.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $13.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均去除率分别为 90.0% 和 94.4%。当水温在  $10 \sim 15^\circ\text{C}$  之间,平均 MLSS 为  $4\,558 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,好氧末端 DO 在  $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时,出水 TN 达标效率仅为 52%,提高 MLSS 到  $6\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上,好氧末端 DO 到  $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上时,出水 TN 达标率显著提高,这一结果与张智等<sup>[18]</sup>报道一致。当水温低于  $10^\circ\text{C}$ ,并接近  $5^\circ\text{C}$ ,即使维持系统 MLSS 在  $7\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上,好氧末端 DO 到  $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上时,出水 TN 达标效率也仅为 67%。当水温低于  $10^\circ\text{C}$ ,但很接近  $10^\circ\text{C}$ ,此时维持 MLSS 和好氧末端 DO 分别在  $7\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上,出水 TN 具有较高的达标效率。由此看出,该工况下模型预测也较可靠有效。

对照表 1 和表 3 分析看出,水温较低时,硝化效率通过提高好氧段曝气强度得到改善(出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均值在  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下),而反硝化效率较低,为获得较好脱氮效果应适当提高  $R$  值。因此,当污泥和混合回流比均维持在 100% 时,脱氮效果欠佳。

另外,3 个工况下中试出水 TP 平均值为  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,不能达到一级 A 标准,建议辅以化学除磷手段。

在整个中试试验期间,进水 COD/TN 平均值为 8.75,脱氮碳源充足<sup>[19,20]</sup>,在工况一和工况二试验中,没有进行硝化液回流,因此,降低了缺氧池 DO 上升的可能,故不会消耗太多碳源<sup>[21,22]</sup>,创造了有利于反硝化的条件,从而获得良好的脱氮效果;在工况三试验中,水温对脱氮效果产生了显著影响,增大好氧段曝气量和提高 MLSS 一定程度上有利于脱氮效果的提高。

由于在实际运行过程中 TN 浓度基本维持在  $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,因此缺乏对工况四的验证试验。但根据前 3 个工况试验的运行结果可以做如下推测:温度在接近且低于  $10^\circ\text{C}$  与  $15^\circ\text{C}$  之间时,只要保证足够 DO 和 MLSS 一定可以达到理想的脱氮效果;但当温度远远低于  $10^\circ\text{C}$  并可能在  $5^\circ\text{C}$  以下,维持较高 DO 和 MLSS 难以使出水氮达标,必须将混合液回流比提高到比该工况要求更高的混合液回流比(参照表 1 中的上限值)。

### 3 结论

综上所述,在 3 种工况试验条件下,模型能较好地适应实际情况的变化。

### 参考文献:

- [1] 马俊,张永祥,刘亮,等.  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺脱氮效果研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2006, **22**(1): 28-31.
- [2] 张杰,臧景红,杨宏,等.  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺的固有缺失和对策研究[J]. 给水排水, 2003, **29**(3): 22-25.
- [3] 郑平,徐向阳,胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 张自杰,龙腾锐,金儒霖,等. 废水处理理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] 王社平,黄宁俊,邵军峰,等. 倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺对城市污水的处理效果分析[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(21): 59-62.
- [6] 杨志泉,周少奇,何伟,等. 改良  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺生物脱氮除磷应用研究[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(1): 79-82.
- [7] 王伟,彭永臻,孙亚男. 污泥回流比对分段进水  $\text{A}/\text{O}$  生物脱氮工艺的影响[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(2): 116-120.
- [8] 彭永臻,王晓莲,王淑莹.  $\text{A}/\text{O}$  脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(8): 1053-1057.
- [9] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic ( $\text{A}^2/\text{O}$ ) wastewater treatment plant (WWTP) [J]. Process Biochemistry, 2004, **39**(11): 1615-1624.
- [10] 李祥,黄勇,郑宇慧,等. 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1288-1292.
- [11] Carrera J, Baeza J A, Vicent T, et al. Biological nitrogen removal of high-strength ammonium industrial wastewater with two-sludge system[J]. Water Research, 2003, **37**(11): 4211-4221.
- [12] 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.
- [13] George L, Jim G, 尚爱安,等. 工艺优化诊断技术用于污水厂的改造[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(2): 26-30.
- [14] 徐伟锋. 生物脱氮除磷 ASM2D 模拟及机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [15] 鞠兴华. 城市污水活性污泥生物脱氮模型及模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [16] GB 8978-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 张智,陈杰云,李勇,等. 处理低温低碳源污水的倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺强化脱氮研究[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(1): 6-8, 12.
- [19] Henze M. Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater[J]. Water Science and Technology, 1991, **23**(4-6): 669-679.
- [20] 陈秀荣,艾奇峰,徐文璐,等. 好氧-低氧生物滤池对低碳氮比污水脱氮研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2986-2992.
- [21] Teck W T, How Y N. Influence of mixed liquor recycle ratio and dissolved oxygen on performance of pre-denitrification submerged membrane bioreactors[J]. Water Research, 2008, **42**(4-5): 1122-1132.
- [22] Li H, Chen Y, Gu G. The effect of propionic to acetic acid ratio on anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) biological phosphorus and nitrogen removal[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(10): 4400-4407.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                     |                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012 .....                                                                                       | WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> ( 1215 ) |
| Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi .....                                            | LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> ( 1223 )             |
| Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban .....                      | WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> ( 1230 )                    |
| Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM <sub>10</sub> from One Coking Plant .....                                                                       | DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> ( 1238 )           |
| Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration .....                                                  | LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> ( 1245 )            |
| Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta .....                                                                                                       | SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong ( 1250 )                                |
| Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process .....                                                                                      | LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> ( 1256 )       |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China .....                                                                                              | ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> ( 1263 )         |
| Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus ( DRP ) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes .....   | WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> ( 1271 )                |
| Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input .....                                                                                         | FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> ( 1278 )             |
| Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area .....                                                                                            | SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo ( 1285 )                            |
| Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing .....                                                                                           | YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> ( 1290 )     |
| Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing .....                                                        | LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> ( 1297 )        |
| Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i> .....                                                                                 | LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> ( 1304 )        |
| Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland .....                                                                                                    | PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> ( 1311 )      |
| Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions .....                                                                       | DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> ( 1318 )      |
| Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water .....                                                            | HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> ( 1326 )       |
| Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO <sub>2</sub> .....                                    | WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> ( 1332 )          |
| Stability of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....                                                                                                                 | FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> ( 1337 )            |
| Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach .....                                                                      | ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> ( 1343 )      |
| Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron ( nZVI ) Catalyzed Hydrogen Peroxide ( H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) ..... | FU Rong-bing ( 1351 )                                                 |
| Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene .....                                                                            | WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> ( 1358 )                   |
| Research on Removal Efficiency of Cd ( II )-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter .....                                                                          | WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> ( 1366 )                |
| Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance .....                                                             | JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> ( 1372 )           |
| Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....                                    | CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan ( 1377 )                           |
| Microbial Reduction of Cu <sup>2+</sup> Mediated by Electroactive Biofilms .....                                                                                                    | LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> ( 1384 )              |
| Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards .....                                                                                          | CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> ( 1391 )          |
| Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons .....                                                                              | HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> ( 1399 )             |
| Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                                                       | WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> ( 1407 )         |
| Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater .....                                                                       | YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> ( 1414 )          |
| Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge .....                                                     | DONG Hui-yu, JI Min ( 1421 )                                          |
| Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism .....                                                                  | YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> ( 1428 )       |
| Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe ( II )-Oxidizing Bacteria .....                                                                                                 | WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> ( 1437 )            |
| Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism .....                                                                      | XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> ( 1443 )                |
| Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene .....                        | ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> ( 1449 )           |
| Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                              | CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> ( 1457 )        |
| Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride ( TAG ) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                            | WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> ( 1462 )       |
| Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots .....                                                                                                        | WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> ( 1468 )                |
| Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O <sub>3</sub> Concentrations in Northeast China .....                                                                       | ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> ( 1473 )    |
| Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses .....                                                                                   | WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> ( 1479 )            |
| Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils .....                                                                                       | CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> ( 1486 )       |
| Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research .....                                                                                                | ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> ( 1491 )           |
| Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet .....                                                                                                    | BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> ( 1498 )       |
| Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area .....                     | XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> ( 1502 )                   |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park .....                                                     | LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> ( 1509 )            |
| Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area .....                                                                               | ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> ( 1516 )            |
| Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator .....                                                                             | XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> ( 1523 )      |
| Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai .....                                                                              | ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> ( 1531 ) |
| Impact of SDBS/Na <sup>+</sup> on Red Soil Colloidal Stability .....                                                                                                                | TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> ( 1540 )              |
| Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues .....                                                                  | ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> ( 1548 )  |
| Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd <sup>2+</sup> by Algal in Water .....                                                                                       | DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> ( 1555 )      |
| Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene .....                                                                                                                        | LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> ( 1561 )      |
| Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate .....                                                             | ZHONG Qiong, LI Huan ( 1566 )                                         |
| Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites .....                                                                             | LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> ( 1576 )         |
| A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead ( Pb ) Concentration in Urban Soils .....                                                                          | YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> ( 1586 )          |
| Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment .....                                                                       | ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> ( 1597 )         |
| Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium .....                                                                                                 | LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> ( 1602 )             |
| Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength .....                                                                      | WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei ( 1613 )                            |

# 《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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