

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                                                                      |                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 2006~2015年北京市不同地区 O <sub>3</sub> 浓度变化                                                                                                | 王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)                                    |
| 南京北郊黑碳气溶胶的来源解析                                                                                                                       | 肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)                                          |
| 电镀厂周边大气 PM <sub>10</sub> 中重金属季节性分布特征及生态风险评价                                                                                          | 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)                                        |
| 广西玉林市大气 PM <sub>10</sub> 和 PM <sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳污染特征分析                                                                          | 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)               |
| 青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征                                                                                                        | 张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)                                                  |
| 大气环境分区管理: 以广东省为例                                                                                                                     | 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)                                        |
| 基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例                                                                                                             | 温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)                                  |
| 基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ <sup>15</sup> N 和 δ <sup>18</sup> O 模拟                                                                          | 王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)                                                   |
| 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策                                                                                                                  | 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)                                   |
| 陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价                                                                                                          | 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)                                        |
| 天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价                                                                                                              | 张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)                                          |
| 西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响                                                                                                        | 王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)                                         |
| 北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价                                                                                                                | 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)                                                 |
| 黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险                                                                                                              | 姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)                                               |
| 淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征                                                                                                              | 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)                                   |
| 磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响                                                                                                               | 卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)                                                 |
| K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> 强化 g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup> 并同步回收 Cu | 党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)                                                 |
| 以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B                                                                                                   | 蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)                                            |
| 氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能                                                                                                              | 马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)                       |
| 铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除                                                                                                              | 曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)                                |
| 水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态                                                                                                                    | 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)                                   |
| 阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响                                                                                                    | 任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)                                      |
| 典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征                                                                                                                  | 赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)                                            |
| 水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响                                                                                                                | 许雯佳, 成小英 (202)                                                          |
| 环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性                                                                                                             | 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)                                             |
| AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟                                                                                                                   | 曹特特, 王林, 李咏梅 (219)                                                      |
| 磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复                                                                                                                      | 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)                                                 |
| 碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响                                                                                                                 | 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)                                        |
| 容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响                                                                                                           | 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)                                              |
| DNBF-O <sub>3</sub> -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物                                                                                             | 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)                                           |
| 交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响                                                                                                      | 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)                                       |
| 纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响                                                                                                               | 周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)                                       |
| 高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用                                                                                                 | 韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)                                        |
| 浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析                                                                                                                  | 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)                                                 |
| 去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气                                                                                                            | 卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)                                                  |
| 污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价                                                                                                              | 王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)                                            |
| 初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 通量日变化特征                                                                          | 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)                                             |
| 3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响                                                                                                            | 武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)                                              |
| 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N <sub>2</sub> O 排放的影响                                                                                      | 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)             |
| 拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: <sup>13</sup> C-CO <sub>2</sub> 脉冲标记                                                                        | 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)                                  |
| 陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征                                                                                                            | 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339) |
| 不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响                                                                                                                  | 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)                                        |
| 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响                                                                                                               | 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)                                     |
| 县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估                                                                                                                 | 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)                                                  |
| 基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测                                                                                                            | 曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)                                       |
| 沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析                                                                                                                  | 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)                                      |
| 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤                                                                                                            | 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)                            |
| 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响                                                                                                                | 封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)                                  |
| 典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异                                                                                                                   | 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)                           |
| 松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征                                                                                                               | 张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)                        |
| 硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响                                                                                                                  | 代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)                                           |
| 长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响                                                                                                             | 王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)                                  |
| 海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较                                                                                                           | 张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)                                         |
| 鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系                                                                                                          | 袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)                                       |
| 畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征                                                                                                                 | 张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)                                                  |
| 烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响                                                                                                           | 章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)                                                 |

# 磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响

卓瑞双, 黄廷林\*, 张瑞峰, 文刚

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 利用中试实验系统, 研究磷酸盐对石英砂滤料表面负载的铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响。结果表明, 当水温为 17.2~21.9℃ 时, 随着运行时间的推移, 未投加磷酸盐滤柱的氨氮去除效果有所下降; 而投加 5~15  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐滤柱的氨氮去除效果稳定, 且去除率大于 95.3%。当水温低于 10.5℃ 时, 滤柱出水氨氮浓度超标, 此时通过提高磷酸盐投加量至 30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  或增加滤层厚度均可实现出水氨氮浓度达标。但随着系统持续运行, 仅增加滤层厚度的滤柱出水氨氮浓度会再次超标。水温在 6.5~10.5℃ 之间, 投加 30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐的条件下, 120 cm 和 80 cm 活性滤层的最大安全进水氨氮浓度分别为 2.34  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 1.95  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。滤柱中生物灭活实验表明活性氧化膜对氨氮的去除同时包括催化氧化作用和生物作用; 投加磷酸盐条件下, 活性氧化膜的总活性和催化氧化活性分别是未投加磷酸盐条件的 1.36 倍和 1.79 倍, 这表明磷酸盐促进了活性氧化膜的催化氧化活性。

**关键词:** 磷酸盐; 铁锰复合氧化膜; 地表水; 氨氮; 催化氧化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0137-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201706004

## Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment

ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin\*, ZHANG Rui-feng, WEN Gang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The effect of phosphate on the ammonium removal performance of iron-manganese co-oxide film coated quartz sands in surface water treatment was investigated in a pilot-scale filtration system. The experimental results showed that the removal efficiency of ammonium decreased with reaction time without phosphate, while it stabilized at a level over 95.3% with phosphate dosing of 5-15  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  at a temperature between 17.2-21.9℃. The effluent ammonium concentration of the filter columns exceeded the permitted limits for drinking water, when the water temperature was below 10.5℃. Fortunately, it can meet the water standards by increasing the amount of dosed phosphate to 30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  or increasing the height of the filter layer. However, the ammonium concentration in the effluent of the filter when only increasing the height of the filter layer exceeded the water standards after running for several days. The maximum safe concentration of ammonium in the influent of the filters with 120 cm and 80 cm height active filter beds were 2.34 and 1.95  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  with the condition of 30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  phosphate, respectively. Microorganism inactivation experiments indicated that the ammonium removal capability of the activated oxide film included catalytic oxidation and biological nitrification simultaneously. The total activity and catalytic oxidation activity of the activated oxide film were 1.36 times and 1.79 times higher than those without phosphate, respectively, which suggested that phosphate can facilitate the catalytic oxidation activity of the activated oxide film.

**Key words:** phosphate; iron-manganese co-oxide film; surface water; ammonium; catalytic oxidation

氨氮是地表水源的主要污染因子之一<sup>[1,2]</sup>。供水系统中过量的氨氮会使消毒效率降低, 增加氯消毒过程中的需氯量<sup>[3]</sup>, 并产生令人不快的嗅味, 甚至对中枢神经系统易造成伤害<sup>[4,5]</sup>。饮用水处理中去除氨氮的方法主要有吸附法和生物法。对于吸附法, 国内外研究主要集中在吸附剂改性这方面, 但往往吸附剂的吸附容量有限, 再生困难, 成本较高, 多适用于小型水厂<sup>[6~8]</sup>。对于生物法, 研究成果主要为对普通滤池进行生物强化<sup>[9,10]</sup>, 目前生物法去除氨氮的技术已比较成熟, 在国内外应用较多, 但其对温度变化幅度大的地表水适应性差, 在自然状态下挂膜较难成功, 且运行管理复杂<sup>[11~13]</sup>。近年来研究发现, 在处理同时含有铁、锰、氨氮复合污染的地

下水时, 通过向水中投加高锰酸钾, 可在石英砂滤料表面形成一层能高效去除地下水中氨氮的铁锰复合氧化膜(活性氧化膜)<sup>[14~16]</sup>。该活性氧化膜为非晶态结构, 主要组成元素为铁、锰、钙、氧等<sup>[17]</sup>。Guo等<sup>[18]</sup>研究发现该活性氧化膜对地下水中氨氮的去除机制为催化氧化作用。相对传统方法, 此种方法具有可实现铁、锰和氨氮的同步高效去除, 启动成熟时间短(大约 26 d), 反应过程几乎没有副产物等

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-07-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400706); 国家自然科学基金项目(51778521, 51678472)

作者简介: 卓瑞双(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水质微污染控制与水质改善理论与技术, E-mail: djewelry@foxmail.com

\* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

优势.

在前期实验工作中发现,将该活性氧化膜应用于地表水中氨氮的去除时,其催化氧化活性随着运行时间推移而有所下降.研究发现投加磷酸盐可以促进活性氧化膜的氨氮去除活性,但对具体的磷酸盐投加量尚未明确,磷酸盐促进与保持活性氧化膜氨氮去除活性的效果及机制也尚未探讨.因此,本文基于实验工作中发现的问题,系统地考察了不同磷酸盐投加量对活性氧化膜去除地表水中氨氮的影响,研究了冬季低温条件下保持活性氧化膜氨氮去除活性的方法,并通过灭活滤柱中的微生物,初步探究了磷酸盐影响活性氧化膜氨氮去除活性的机制,使活性氧化膜应用于地表水处理成为可能.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置主要由4个完全相同的有机玻璃滤柱组成,分别命名为B0、B1、B2和B3,如图1所示.滤料为地下水条件下培养成熟的铁锰复合氧化膜活性滤料,有效滤层厚度为85 cm,承托层为20 cm. B0、B1、B2和B3滤柱进行同步实验,滤速为 $7 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ .

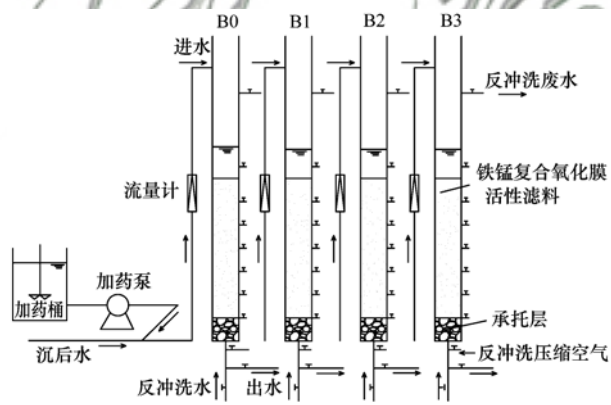


图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of the pilot-scale filter

### 1.2 水质参数

地表水源水经过混凝沉淀处理后,通过加药泵向沉后水中投加一定量的氨氮( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ),调节进水氨氮浓度,再由滤柱进行过滤处理.实验期间,滤柱进水水质参数如表1所示.

### 1.3 实验方法

夏秋季节水温在 $17.2 \sim 21.9^\circ\text{C}$ 范围内,B0滤柱不投加磷酸盐,B1、B2和B3滤柱分别投加5、10和 $15 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸盐( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ),研究不同磷酸盐投加量对活性氧化膜氨氮去除效果的影响.

表1 滤柱进水水质参数

Table 1 Water quality of the feed water used in the pilot-scale filter system

| 水质指标                                                     | 范围          |
|----------------------------------------------------------|-------------|
| $T/^\circ\text{C}$                                       | 6.5 ~ 21.9  |
| $\text{DO}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                | 6.4 ~ 11.2  |
| pH                                                       | 7.23 ~ 7.77 |
| 浊度/NTU                                                   | 0.41 ~ 1.06 |
| 高锰酸盐指数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                  | 0.85 ~ 2.49 |
| $\text{TOC}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$               | 0.44 ~ 1.73 |
| $\text{TP}/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$              | 3 ~ 8       |
| 可溶性正磷酸盐/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$               | <2          |
| 碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 50 ~ 55     |
| $\text{Al}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                | 0.46 ~ 1.50 |

通过比较各个滤柱上层65 cm滤层的氨氮体积去除速率(volumetric ammonium removal rate, VARR),进一步研究活性氧化膜氨氮去除活性的变化,VARR用如下公式计算<sup>[11]</sup>:

$$\text{VARR} = \frac{(c_{a,\text{in}} - c_{a,\text{out}}) \times Q}{\Delta z \times A} \quad (1)$$

式中, $c_{a,\text{in}}$ 和 $c_{a,\text{out}}$ 分别为滤柱进水和取样点出水的氨氮浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), $Q$ 为进水流量( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), $A$ 为滤柱的横截面积( $\text{m}^2$ ), $\Delta z$ 为对应取样点的滤层厚度(m).

冬季低温阶段,水温低于 $10.5^\circ\text{C}$ 时,活性氧化膜的氨氮去除活性明显下降,采取增加磷酸盐投加量至 $30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和将滤层厚度从85 cm增至120 cm两种操作方式以保证系统对氨氮的处理效果,比较其效果差异,并考察滤柱的最大氨氮去除能力.

对未投加与投加磷酸盐的两个滤柱中微生物进行灭活.将 $\text{O}_3$ 从滤柱底部持续通入150 min,实验过程中臭氧浓度为 $1.90 \sim 3.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,对灭活前后活性氧化膜表面的细菌总数进行测定<sup>[19,20]</sup>.对比灭活前后滤柱氨氮去除效果的差异,并对活性氧化膜进行SEM和EDS表征分析,初步探究磷酸盐影响活性氧化膜氨氮去除活性的机制.

### 1.4 分析测试方法

水样均采用标准方法测定<sup>[20]</sup>.氨氮:纳氏试剂分光光度法;硝酸盐氮:紫外分光光度法;亚硝酸盐氮: $N$ -(1-萘基)-乙二胺光度法;TP:钼锑抗分光光度法;高锰酸盐指数:高锰酸盐指数法; $\text{O}_3$ :靛蓝二磺酸钠分光光度法<sup>[21]</sup>;碱度:酸碱指示剂滴定法;DO浓度:溶氧仪(雷磁JPB-607A);pH:pH计(雷磁PHS-3C);水温:温度计;浊度:浊度计(雷磁WGZ-2000);TOC:燃烧氧化-非分散红外吸收法(岛津TOC-ASI);Al:电感耦合等离子体质谱(美国

PE 200-ELAN DRC-e); 表面形貌及元素组成: 扫描电镜(Quanta 600 FEG); 细菌总数: 平板计数法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同磷酸盐投加量对铁锰复合氧化膜活性的影响

#### 2.1.1 不同磷酸盐投加量下的氨氮去除效果

不同磷酸盐投加量下滤柱的进出水氨氮浓度变化见图 2。实验期间水温为  $17.2 \sim 21.9^{\circ}\text{C}$ , 进水氨氮浓度为  $1.16 \sim 1.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 未投加磷酸盐、投加  $5$ 、 $10$  和  $15 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐 4 个滤柱的出水氨氮平均浓度分别为  $0.20$ 、 $0.05$ 、 $0.05$  和  $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 氨氮去除率分别为  $84.4\%$ 、 $96.1\%$ 、 $96.1\%$  和  $95.3\%$ 。图 3 为不同磷酸盐投加量下滤柱的氨氮浓度沿程变化。由图 3(a) 可知, 未投加磷酸盐滤柱的氨氮浓度沿程变化曲线随运行时间逐渐上移, 氨氮达标所需滤层从  $65 \text{ cm}$  增至  $85 \text{ cm}$ , 说明未投加磷酸盐条件下活性氧化膜的氨氮去除活性随运行时间逐渐下降。由图 3(b) ~ 3(d) 可知, 运行第 15 d, 投加磷酸盐滤柱的氨氮去除效果均有明显提升, 氨氮达标所需滤层从  $65 \text{ cm}$  减至  $45 \text{ cm}$ ; 运行第 29 d, 氨氮去除效果与第 15 d 相差不大。结合图 2 和图 3 可知未投加磷酸盐滤柱的氨氮去除活性比投加磷酸盐的低, 且投加  $5$ 、 $10$  和  $15 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐滤柱的氨氮去除活性基本一致, 说明磷酸盐可以促进活性氧化膜

的氨氮去除活性, 且在  $5 \sim 15 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐投加量条件下其氨氮去除活性基本一致, 此时  $5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐即可保持活性氧化膜的氨氮去除活性。

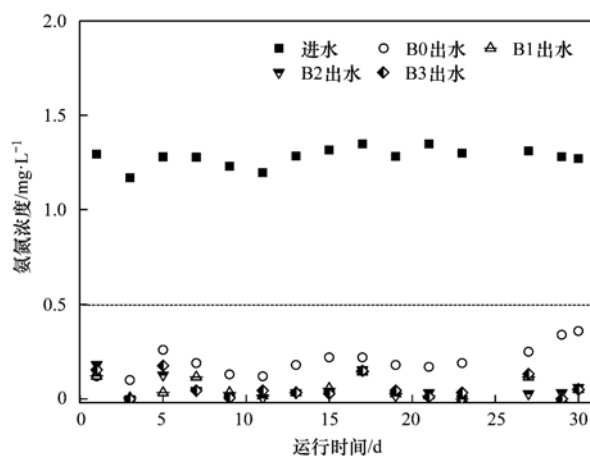


图 2 不同磷酸盐投加量下滤柱进出水氨氮浓度的变化

Fig. 2 Ammonium concentrations in influent and effluent water of the filters at different phosphate dosages

#### 2.1.2 不同磷酸盐投加量下的氨氮体积去除效率

为进一步研究活性氧化膜氨氮去除活性的变化, 对滤柱上层  $65 \text{ cm}$  滤层的氨氮体积去除速率进行了计算, 结果如图 4 所示。从中可知随着运行时间的增加, 未投加磷酸盐滤柱的氨氮体积去除效率从最初的  $11.10 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$  下降到第 29 d 的  $7.43 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ , 减少了  $33.1\%$ , 仅为同期投加  $5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐滤柱的  $55.2\%$ 。随着运行时间的推

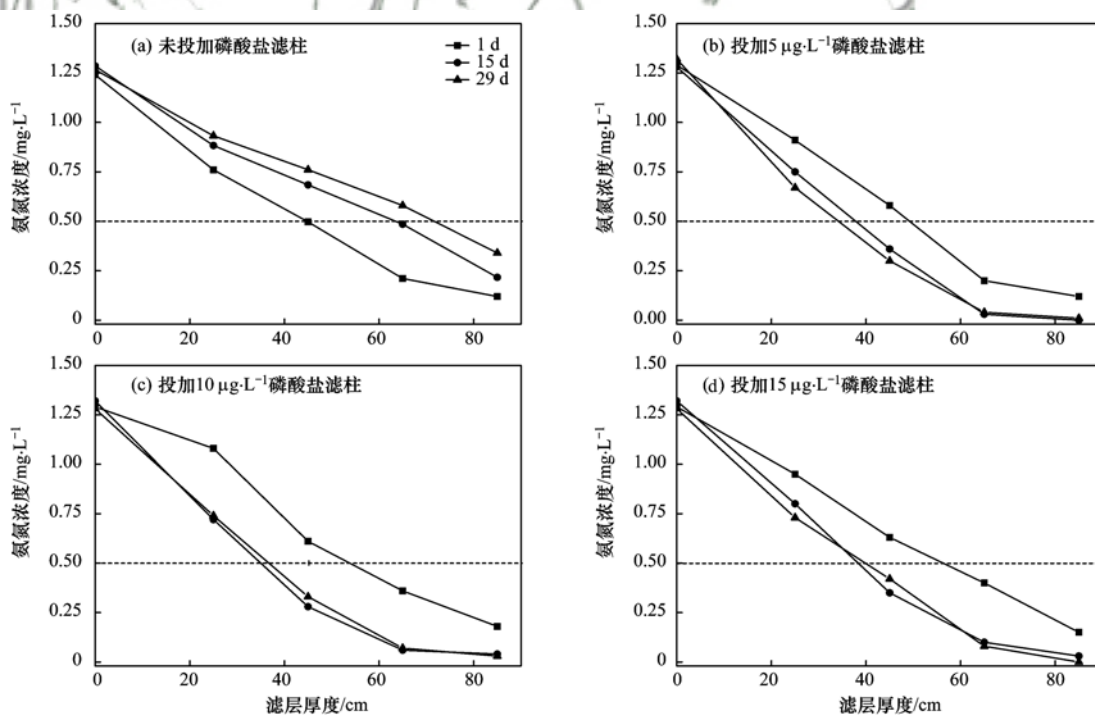


图 3 不同磷酸盐投加量下的氨氮浓度沿程变化

Fig. 3 Ammonium concentrations depth profiles at different phosphate dosages

移,未投加磷酸盐滤柱的氨氮去除活性逐渐下降,而投加  $5 \sim 15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐滤柱的氨氮去除活性均有所提升且相差不大,说明此时  $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐即可保持活性氧化膜的氨氮去除活性,与图 2 和图 3 所得结论一致。

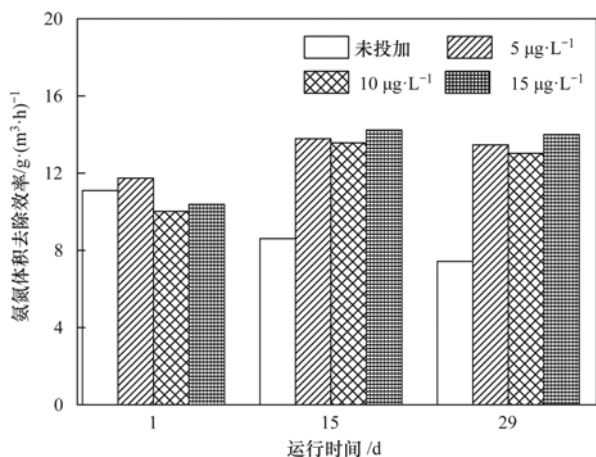


图 4 不同磷酸盐投加量下的氨氮体积去除效率

Fig. 4 Volumetric ammonium removal rate at different phosphate dosages

## 2.2 冬季低温条件下铁锰复合氧化膜活性的保持

### 2.2.1 不同操作方式下活性的保持效果

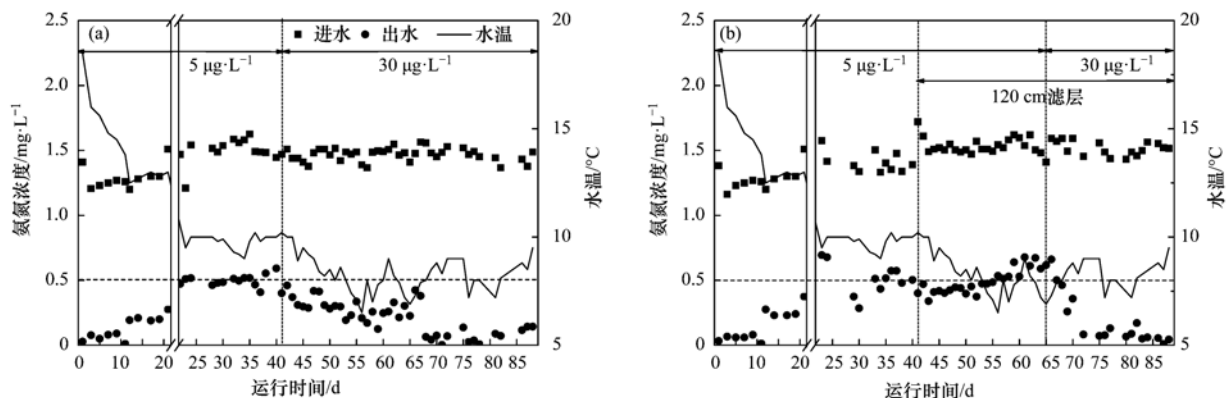
以 B2 和 B3 滤柱作为考察对象,研究冬季低温条件下铁锰复合氧化膜在不同操作方式下活性的保持效果,如图 5 所示。由前面实验结果可知,投加  $5$ 、 $10$  和  $15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐滤柱的氨氮去除效果基本一致,故运行初期 ( $1 \sim 40$  d), B2 和 B3 滤柱均改投  $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐。运行至第 12 d, 水温降低为  $12.5^\circ\text{C}$ , B2 和 B3 滤柱的出水氨氮均有所升高但仍达标,说明水温不低于  $12.5^\circ\text{C}$  时,  $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐仍可保持活性氧化膜的氨氮去除活性。运行至第 21 d, 因系统故障,两个滤柱均停止运行 35 d (图中折

断线), 之后恢复正常运行。运行至第 22 d, 水温低于  $10.5^\circ\text{C}$ , B2 和 B3 滤柱出水氨氮均超标。分析其原因, 可能是因为水温的降低, 导致氨氮去除活性进一步降低, 此时  $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐已不足以保持活性氧化膜的氨氮去除活性。

运行至第 41 d, 将 B3 滤柱磷酸盐投加量增加至  $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , B2 滤柱滤层厚度增加至  $120 \text{ cm}$ , 并比较其处理效果差异。由图 5(a) 可知, B3 滤柱投加  $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐后, 当天出水氨氮浓度达标, 在之后的运行过程中, 其氨氮去除活性持续提升, 运行至第 68 d, 氨氮去除率可达  $95.4\%$ ; 在水温为  $6.5^\circ\text{C}$  时, 出水氨氮浓度仍小于  $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图 5(b) 可知, B2 滤柱滤层厚度从  $85 \text{ cm}$  增加至  $120 \text{ cm}$  后, 出水氨氮浓度降低至  $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 但运行 14 d 后 (第 55 d) 出水氨氮浓度再次超标。分析原因可能是冬季低温阶段活性氧化膜本身的活性较低, 增加滤层厚度并不能保持其活性, 仅靠延长水力停留时间 (由原先的  $7.29 \text{ min}$  增至  $10.29 \text{ min}$ ) 虽然短时间内可实现出水氨氮浓度达标, 但随着水温的降低, 活性氧化膜的活性持续降低, 滤柱的出水氨氮浓度会再次超标。运行第 65 d, 将 B2 滤柱的磷酸盐投加量增加至  $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 滤层厚度仍为  $120 \text{ cm}$ , 运行 3 d 后 (第 68 d) 出水氨氮浓度达标, 且随着运行时间的推移, 其氨氮去除活性迅速提升, 运行 7 d 后 (第 72 d), 氨氮去除率可达  $95.5\%$ 。结合图 5 可知, 冬季低温条件下仅增加滤层厚度并不能取得稳定的氨氮去除效果, 投加  $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐可以保证滤柱出水氨氮稳定达标。

### 2.2.2 不同滤层厚度的最大安全进水氨氮浓度

B2 和 B3 滤柱均投加  $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐, 氨氮去除效果稳定后, 对其最大氨氮去除能力进行了考



(a) 增加磷酸盐投加量的进出水氨氮浓度变化; (b) 增加滤层厚度的进出水氨氮浓度变化

图 5 不同操作方式下的氨氮去除效果

Fig. 5 Ammonium removal efficiency under different operating conditions

察,结果如图 6 所示. 从中可知,水温在 6.5 ~ 10.5℃之间,滤速为 7 m·h<sup>-1</sup>时,120 cm 和 80 cm 活性滤层的最大安全进水氨氮浓度分别为 2.34 mg·L<sup>-1</sup>和 1.95 mg·L<sup>-1</sup>. 可以看出在冬季低温条件下,通过增加磷酸盐投加量,活性氧化膜仍能高效去除地表水中的氨氮.

对比生物法在低温条件下的运行效果,发现在低温时期普通生物滤池的生物量和生物活性低,抗冲击负荷能力差,反冲洗频率高,难以应对进水氨

氮浓度的剧烈波动<sup>[22,23]</sup>. Andersson 等<sup>[24]</sup>认为水温是影响生物滤池氨氮处理效果的重要因素,水温在 4 ~ 10℃时氨氮去除率仅有 10% ~ 40% 左右. 贺瑞敏<sup>[25]</sup>认为适当降低水力负荷,延长水力停留时间,可以减少低温对去除氨氮的负面影响,但由于生物滤池中硝化细菌的活性受到严重抑制,即使在很低的水力负荷条件下,仍不能达到良好的去除. 因而相较于传统的生物法,活性氧化膜催化氧化去除氨氮的方法在低温时更有优势.

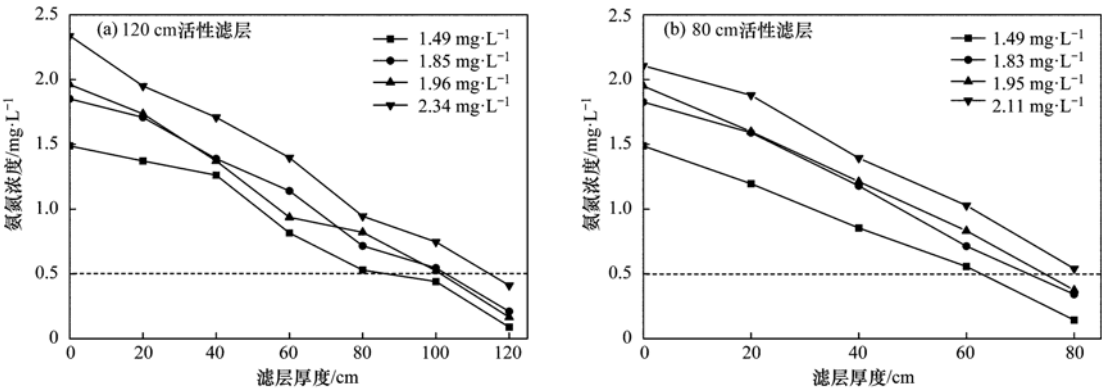


图 6 不同滤层厚度的最大安全进水氨氮浓度  
Fig. 6 Maximum safe concentration of ammonium in the influent for different heights of filter layers

**2.3 磷酸盐影响活性氧化膜氨氮去除活性的机制**  
评价饮用水中臭氧消毒效果的指标为 CT 值(C 为臭氧浓度: mg·L<sup>-1</sup>, T 为接触时间: min). 美国环保署颁布的地表水处理规程 (surface water treatment rule, SWTR) 明确臭氧对细菌去除率达 99.00% ~ 99.99% 的 CT 值为 0.3 ~ 1.8 mg·min·L<sup>-1</sup><sup>[26,27]</sup>. 水中含有 0.30 ~ 0.60 mg·L<sup>-1</sup> 的臭氧时,对细菌、病毒等微生物的内部结构有极强的氧化破坏性,可达到杀灭细菌的效果,若臭氧浓度超过 1.00 mg·L<sup>-1</sup> 以上便能杀灭芽孢、病毒、真菌等微生物<sup>[28]</sup>. 臭氧对硝化细菌也有明显的杀灭效果<sup>[29]</sup>. 本实验中臭氧灭活的 CT 值为 285 ~ 588 mg·min·L<sup>-1</sup>,远大于灭活细菌对 CT 值的要求,因而可以有效杀灭滤柱内的微生物. 为进一步证明灭活方式有效,对灭活前后活性氧化膜表面的细菌总数进行测定,结果见表 2. 可以看到,灭活后活性氧化膜表面的细菌总数为 0,说明臭氧灭活彻底有效. 同时 Guo 等<sup>[18]</sup>对臭氧灭活前后活性氧化膜的性质变化进行了研究,结果表明臭氧对活性氧化膜的结构几乎没有影响. 因此可以认为,灭活后活性氧化膜的氨氮去除为催化氧化作用.

臭氧灭活前和灭活后滤柱的氨氮去除效果变化,如图 7 所示. 灭活前,投加和未投加磷酸盐滤柱

的氨氮去除量分别为 1.46 mg·L<sup>-1</sup>和 1.07 mg·L<sup>-1</sup>; 灭活后,其氨氮去除量分别为 1.11 mg·L<sup>-1</sup>和 0.62 mg·L<sup>-1</sup>. 说明活性氧化膜对氨氮的去除同时包括催化氧化作用和生物作用. 比较灭活前和灭活后的氨氮去除效果可知,投加和未投加磷酸盐条件下活性氧化膜的催化氧化活性分别约占总活性的 76.0% 和 57.9%. 同时投加磷酸盐条件下,活性氧化膜的总活性和催化氧化活性分别是未投加磷酸盐条件的 1.36 倍和 1.79 倍,这表明磷酸盐促进了活性氧化膜的催化氧化活性.

表 2 灭活前后活性氧化膜表面细菌总数的变化

| Table 2 Total number of bacteria on the activated oxide film before and after inactivation |                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 编号                                                                                         | 细菌总数(以湿滤料计)/cfu·g <sup>-1</sup> |
| ①投加磷酸盐灭活前                                                                                  | 5.6 × 10 <sup>4</sup>           |
| ②投加磷酸盐灭活后                                                                                  | 0                               |
| ③未投加磷酸盐灭活前                                                                                 | 1.6 × 10 <sup>4</sup>           |
| ④未投加磷酸盐灭活后                                                                                 | 0                               |

为进一步研究磷酸盐影响活性氧化膜催化氧化活性的机制,对未投加与投加磷酸盐滤柱的滤料进行 SEM 和 EDS 表征分析. 由图 8 的 SEM 表征结果可知,未投加磷酸盐的滤料表面比较粗糙,而投加磷酸盐的滤料表面较为光滑,其表面形貌的差异很可

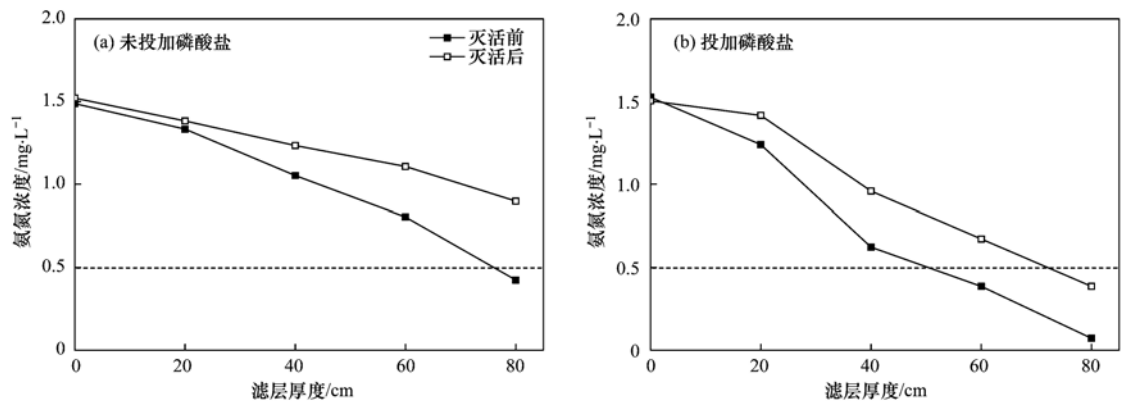
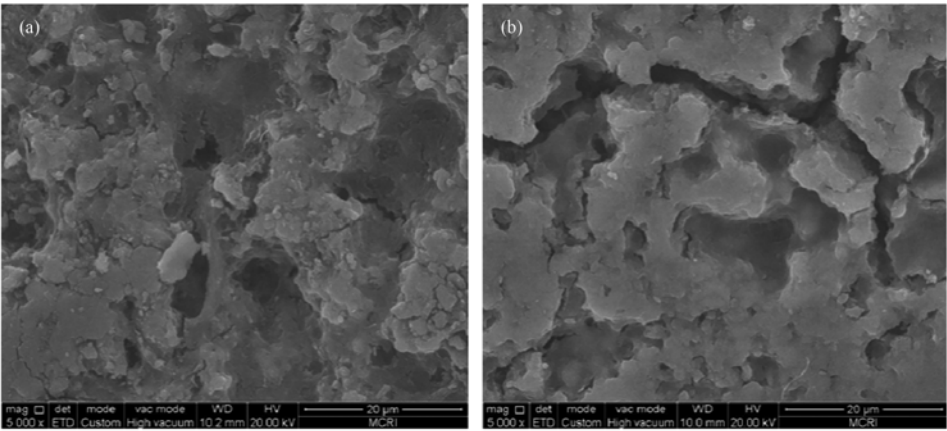


图 7 活性氧化膜臭氧灭活前后的氨氮浓度沿程变化

Fig. 7 Ammonium concentration depth profiles of the activated oxide film before and after ozone inactivation



(a) 未投加磷酸盐; (b) 投加磷酸盐

图 8 活性氧化膜 SEM 图

Fig. 8 SEM images of the activated oxide film

能是因为磷酸盐的投加造成的. 由图 9 的 EDS 表征结果显示,未投加与投加磷酸盐的滤料表面元素基本相同,主要为 Mn、O、Al、Ca 等. 与地下水条件的滤料表面元素<sup>[17]</sup>对比发现,Al 并不是活性氧化膜的原始组成元素,因此活性氧化膜应用于地表水处理后其催化氧化活性有所下降很有可能是 Al 在

滤料表面积累导致的. 未投加与投加磷酸盐条件下的活性氧化膜表面 Al 原子百分比分别为 8.70% 和 7.18%,且滤料表面未检测到 P 元素的存在,推测可能是磷酸盐与滤料表面的 Al 结合成其它形态,使其易于从滤料表面脱落,从而削弱了 Al 对活性氧化膜的影响.

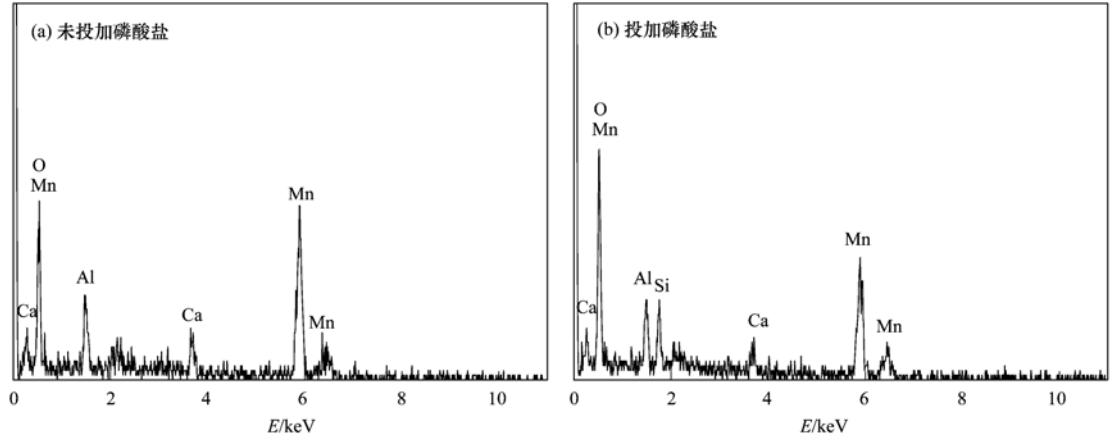


图 9 活性氧化膜 EDS 谱线

Fig. 9 EDS spectra of the activated oxide film

### 3 结论

(1) 磷酸盐可以有效促进与保持铁锰复合氧化膜的氨氮去除活性. 水温在 12.5℃ 以上时, 投加 5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐即可保持活性氧化膜的氨氮去除活性; 冬季低温阶段(水温为 6.5 ~ 10.5℃ 时), 仅增加滤层厚度并不能取得稳定的氨氮去除效果, 投加 30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸盐可以保持滤柱出水氨氮稳定达标.

(2) 活性氧化膜对氨氮的去除同时包括催化氧化作用和生物作用, 投加和未投加磷酸盐条件下活性氧化膜的催化氧化活性分别约占总活性的 76.0% 和 57.9%. 投加磷酸盐条件下, 活性氧化膜的总活性和催化氧化活性分别是未投加磷酸盐条件的 1.36 倍和 1.79 倍, 这表明磷酸盐促进了活性氧化膜的催化氧化活性.

(3) 通过 SEM 和 EDS 表征可以推测, 活性氧化膜应用于地表水处理后其催化氧化活性有所下降很有可能是 Al 在滤料表面积累导致的. 未投加与投加磷酸盐条件下的活性氧化膜表面 Al 原子百分比分别为 8.70% 和 7.18%, 且滤料表面未检测到 P 元素的存在, 磷酸盐影响活性氧化膜催化氧化活性的原因初步推测可能是磷酸盐与滤料表面的 Al 结合成其它形态, 使其易于从滤料表面脱落, 从而削弱了 Al 对活性氧化膜的影响.

#### 参考文献:

- [1] 矫勇, 胡四一. 中国水资源公报 2014[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [2] 周怀东, 彭文启, 杜霞, 等. 中国地表水水质评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(4): 255-264.  
Zhou H D, Peng W Q, Du X, *et al.* Assessment of surface water quality in China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(4): 255-264.
- [3] 魏彬, 李君, 崔莹, 等. 水厂出水加氯消毒的加氯量确定[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 86-88, 92.  
Wei B, Li J, Cui Y, *et al.* Determination of chlorine dosage during chlorination of finished water from waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 86-88, 92.
- [4] 杜志鹏, 刘文君, 张弥, 等. 消毒过程中氨氮对氯耗的影响研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(13): 53-55.  
Du Z P, Liu W J, Zhang M, *et al.* Study on impact of ammonia nitrogen on chlorine consumption in disinfection process [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(13): 53-55.
- [5] Enns G M. Neurologic damage and neurocognitive dysfunction in urea cycle disorders[J]. Seminars in Pediatric Neurology, 2008, 15(3): 132-139.
- [6] 代瑞华, 马捷汀. 改性沸石吸附氨氮及电化学再生研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1): 81-85.  
Dai R H, Ma J T. On ammonia-absorption from sewage by means of modified zeolite and its electrochemical regeneration [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(1): 81-85.
- [7] Zhang Y J, Mancke R G, Sabelfeld M, *et al.* Adsorption of trichlorophenol on zeolite and adsorbent regeneration with ozone [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 271: 178-184.
- [8] Wang Y, Kmiya Y, Okuhara T. Removal of low-concentration ammonia in water by ion-exchange using Na-mordenite [J]. Water Research, 2007, 41(2): 269-276.
- [9] 夏琼琼, 陈卫, 罗彬. 饮用水生物强化过滤处理效能及其影响因素研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 41-45.  
Xia Q Q, Chen W, Luo B. A review of some advances in research of effect and influencing factors of enhanced biological filtration for drinking water treatment [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(1): 41-45.
- [10] 杨威, 田家宇, 李圭白. 生物活性滤池饮用水除氨氮的影响因素[J]. 化工学报, 2008, 59(9): 2316-2321.  
Yang W, Tian J Y, Li G B. Factors influencing ammonia removal of biological activated filter in drinking water treatment [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(9): 2316-2321.
- [11] Lee C O, Boe-Hansen R, Musovic S, *et al.* Effects of dynamic operating conditions on nitrification in biological rapid sand filters for drinking water treatment [J]. Water Research, 2014, 64: 226-236.
- [12] 刘冰, 范辉, 余国忠, 等. 氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2394-2402.  
Liu B, Fan H, Yu G Z, *et al.* Mechanism of  $\text{NH}_4^+$ -N removal in drinking water biofilter [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2394-2402.
- [13] Huang X F, Li W G, Zhang D Y, *et al.* Ammonium removal by a novel oligotrophic *Acinetobacter* sp. Y16 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification at low temperature[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 44-50.
- [14] 布浩, 黄廷林, 郭英明, 等. 石英砂表面活性滤膜去除地下水中氨氮的试验研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1045-1051.  
Bu H, Huang T L, Guo Y M, *et al.* Removal of ammonium from groundwater by a co-oxide filter film coating on quartz sands [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1045-1051.
- [15] 邵跃宗, 黄廷林, 史昕欣, 等. 地下水中石英砂滤层去除氨氮的动力学方程和基于反应活化能的分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2067-2071.  
Shao Y Z, Huang T L, Shi X X, *et al.* Kinetics of ammonium removal in groundwater by composite oxides film coating on silica sands and the analysis based on activation energy [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(6): 2067-2071.
- [16] 汪洋, 黄廷林, 文刚, 等. 地下水中锰对滤料表面氧化膜去除氨氮的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5737-5744.  
Wang Y, Huang T L, Wen G, *et al.* Effect of manganese on removal of ammonia from groundwater by co-oxides membrane coated sands [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(12): 5737-5744.
- [17] 曹昕. 铁锰复合氧化物催化氧化去除地下水中氨氮研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
Cao X. The study on catalytic oxidation of ammonia in groundwater by co-oxides of iron and manganese [D]. Xi'an:

- Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [18] Guo Y M, Huang T L, Wen G, *et al.* The simultaneous removal of ammonium and manganese from groundwater by iron-manganese co-oxide filter film; the role of chemical catalytic oxidation for ammonium removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **308**: 322-329.
- [19] Magic-Knezev A, Van der Kooij D. Optimisation and significance of ATP analysis for measuring active biomass in granular activated carbon filters used in water treatment [J]. *Water Research*, 2004, **38**(18): 3971-3979.
- [20] 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.
- [21] Bader H, Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method[J]. *Water Research*, 1981, **15**(4): 449-456.
- [22] 杨家轩, 马军, 时玉龙, 等. 气浮/复合滤料生物滤池工艺处理低温、高氨氮原水[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(21): 5-10.  
Yang J X, Ma J, Shi Y L, *et al.* Combined process of sedimentation, dissolved air flotation and biofilter with multi-layer media for treating raw water with heavy pollution and high ammonia nitrogen at low temperature [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(21): 5-10.
- [23] Zhang D Y, Li W G, Huang X F, *et al.* Removal of ammonium in surface water at low temperature by a newly isolated *Microbacterium* sp. strain SFA13 [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **137**: 147-152.
- [24] Andersson A, Laurent P, Kihn A, *et al.* Impact of temperature on nitrification in biological activated carbon (BAC) filters used for drinking water treatment [J]. *Water Research*, 2001, **35**(12): 2923-2934.
- [25] 贺瑞敏. 曝气生物滤池预处理官厅水库水源水的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [26] Lev O, Regli S. Evaluation of ozone disinfection systems: characteristic concentration  $c$  [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1992, **118**(4): 477-494.
- [27] Lev O, Regli S. Evaluation of ozone disinfection systems: characteristic time  $T$  [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1992, **118**(2): 268-285.
- [28] 齐爱玲. 饮用水臭氧消毒模型的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
Qi A L. Ozone disinfection model of drinking water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [29] Zhang G M, Yang J, Liu H Z, *et al.* Sludge ozonation: disintegration, supernatant changes and mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(3): 1505-1509.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------|
| Variation of O <sub>3</sub> Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015                                                                              | WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>         | ( 1 )   |
| Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing                                                                                           | XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>                | ( 9 )   |
| Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>10</sub> Around Electroplating Plants                                              | ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>          | ( 18 )  |
| Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> in Yulin City, Guangxi                                                      | HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>       | ( 27 )  |
| Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea | ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>           | ( 38 )  |
| Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province                                                                                                    | YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>        | ( 49 )  |
| Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing                                               | WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>               | ( 57 )  |
| Simulation of Nitrate Isotopic ( $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ ) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model      | WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>             | ( 68 )  |
| Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed                                                             | CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>          | ( 77 )  |
| Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir                                                  | YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>       | ( 89 )  |
| Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin                                                          | ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>                | ( 99 )  |
| Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China              | WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>                  | ( 109 ) |
| Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing                                                                   | CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>        | ( 117 ) |
| Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River                                                                   | YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>                   | ( 123 ) |
| Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China            | ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>          | ( 130 ) |
| Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment                                                    | ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> | ( 137 ) |
| Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) <sub>3</sub> <sup>2-</sup> and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate                            | DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>         | ( 145 ) |
| Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation                                                           | PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>               | ( 152 ) |
| Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions                                                       | MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>      | ( 161 ) |
| Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal                                              | ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>            | ( 170 ) |
| Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid                                                                                           | MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>                  | ( 179 ) |
| Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol                               | REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>             | ( 187 ) |
| Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater                                                                                                    | ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>             | ( 195 ) |
| Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor                                   | XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>                     | ( 202 ) |
| Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor                                                                                                       | DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>                  | ( 212 ) |
| Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation                                                                                 | CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>                | ( 219 ) |
| Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System                                                                                                | GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>           | ( 227 ) |
| Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant                                                                                      | LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>              | ( 232 ) |
| Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process                                                                         | LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>                  | ( 239 ) |
| Combined Process of DNB-F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal                                                | ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>        | ( 247 ) |
| Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge        | SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>     | ( 256 ) |
| Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor                                                     | ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>           | ( 263 ) |
| Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H <sub>2</sub> S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion                  | HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>                  | ( 269 ) |
| Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin                                                           | LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>        | ( 276 ) |
| Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge                                                                   | LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>                   | ( 284 ) |
| Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation                                                     | WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>             | ( 292 ) |
| Diurnal Variations of CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter                 | YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>          | ( 300 ) |
| Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District                                                        | WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>                   | ( 310 ) |
| Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N <sub>2</sub> O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System              | HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>     | ( 321 ) |
| Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: <sup>13</sup> C-CO <sub>2</sub> Pulse-labeling       | CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>          | ( 331 ) |
| Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi                                     | LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>         | ( 339 ) |
| Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions                                                                                | ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>            | ( 348 ) |
| Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration                                                                                | XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>              | ( 355 ) |
| Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale                                                                       | LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>               | ( 363 ) |
| Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals                                                                          | ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>    | ( 371 ) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area                                            | LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>       | ( 379 ) |
| Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash                                            | ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>           | ( 389 ) |
| Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures                                        | FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>              | ( 399 ) |
| Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System                                                                                          | LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>           | ( 406 ) |
| Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream                                                    | ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>         | ( 415 ) |
| Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation                                                                     | DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>       | ( 422 ) |
| Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil                                                     | WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>             | ( 430 ) |
| Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies                          | ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>                   | ( 438 ) |
| Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake                                    | YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>            | ( 450 ) |
| Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures                                                                      | ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>      | ( 460 ) |
| Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators                      | ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>             | ( 467 ) |