

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筶箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤微生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制

白润英¹, 陈湛^{1,2}, 张伟军^{3*}, 王东升^{2,3}

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘要: 本研究采用过氧化钙对活性污泥进行预处理, 深入分析了调理过程中污泥过滤脱水性能、絮体结构以及反应动力学的变化特性, 探讨了亚铁离子协同过氧化钙处理对污泥特性的影响. 结果表明, 经过 CaO_2 处理后, 污泥的过滤脱水性能先改善后恶化, 当投加量(以 TSS 计)为 $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 污泥的过滤脱水效果达到最佳. 同时, 污泥絮体结构变得疏松破碎, 其上清液有机物浓度出现了明显的上升, 污泥得到了有效裂解. 污泥溶解反应过程遵循零级反应动力学模型, 反应速率常数为 $15.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. 此外, 亚铁离子和 CaO_2 协同处理可以进一步强化污泥中大分子有机物的裂解释放, 同时, 反应过程中形成铁离子的絮凝作用可以实现污泥絮体结构的重建, 从而改善污泥过滤脱水性能. 该研究成果为 CaO_2 及其联用处理技术在污泥处理过程中的应用提供了必要的理论依据.

关键词: 活性污泥; 过氧化钙; 亚铁; 絮体形态; 脱水性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1151-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607056

Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge

BAI Run-ying¹, CHEN Zhan^{1,2}, ZHANG Wei-jun^{3*}, WANG Dong-sheng^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The evolution of sludge filtration dewaterability, floc structure and hydrolytic kinetics with calcium peroxide oxidation pre-treatment was investigated in this study. The effect of sludge characteristics with combined process of ferrous ion and calcium peroxide was deeply analyzed and the result suggested that the sludge dewatering performance was improved first and then worsened after CaO_2 addition. When the dosage was $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, sludge reached its optimal dewaterability. At the same time, sludge was effectively dissolved and the floc structure became loose and broken with the increase of organic matters in the supernatant. Moreover, sludge solubilization process followed the pseudo-zero-order kinetic equation well and the reaction rate of sludge with CaO_2 treatment was $15.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. In addition, sludge floc lysis was enhanced by the treatment of ferrous ion and calcium peroxide oxidation, whilst sludge dewaterability was improved due to the reconstruction of sludge floc structure by the iron ions produced. This study provided theoretical basis for application of calcium peroxide pre-treatment and its combining technique in sludge treatment.

Key words: activated sludge; calcium peroxide; ferrous ion; floc morphology; dewaterability

随着我国城市污水处理设施的普及, 处理率的提高和处理程度的深化, 污泥的产生量有了较大的增长^[1]. 如果没有对这些大量的污泥进行有效妥善的处理, 这将对我国的生态环境造成巨大的威胁^[2]. 然而, 传统的污泥处理工艺费用昂贵, 占到了整个污水处理厂运行成本的 60% 以上^[3]. 此外, 污泥处理还面临着许多的技术难题与挑战, 从二沉池产生的剩余活性污泥含水率达到了 99% 以上, 由于高的污泥含水率总是伴随着污泥体积庞大、运输费用昂贵、污泥运输难度大以及占用处理场地大等问题. 因此, 改善污泥脱水效率成为了污水处理乃至环境科学技术领域的重要研究方向.

通常, 污泥中的水分包括游离水(约占 70%)、

间隙水(约占 20%)、吸附水(约占 7%)和结合水(约占 3%)等^[4]. 如果不考虑污泥本身的性质, 污泥的脱水效率主要取决于脱水设备的选型和化学调理方式^[5]. 一般而言, 为了改善污泥的过滤脱水性能, 之前会对污泥进行适当的化学预处理. 例如, 通过电中和以及吸附架桥作用, 无机或者有机絮凝剂可以使得污泥胶体形成较大的絮体, 便于大幅去除污泥中的水含量^[6, 7]. 胞外聚合物(extracellular

收稿日期: 2016-07-07; 修订日期: 2016-10-11

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2016M590733); 中央高校基本科研业务费专项(CUG160824); 国家自然科学基金项目(51678546)

作者简介: 白润英(1971~), 女, 副教授, 主要研究方向为环境污染治理, E-mail: brybry2005@126.com

* 通信作者, E-mail: zhwj_1986@126.com

polymeric substances, EPS) 占到了污泥总固体的 60% ~ 80%^[8]. 污泥 EPS 中含有大量的结合水, 而传统的污泥调理方法并不能有效地破坏 EPS, 使之将结合水转化成自由水去除^[9]. 而高级污泥调理技术 (AST) 可以通过溶解 EPS 到达改善污泥过滤脱水性能以及降低泥饼含水率的目的, 例如, 光 Fenton/Fenton 氧化技术^[10~12]、酸碱处理^[13]、热处理^[9]、酶处理^[14] 以及集成化处理等.

过氧化钙 (CaO₂) 是一种通用并且安全的经典氧化剂, 被称为“固态”过氧化氢 (H₂O₂)^[15]. 一般情况下, CaO₂ 在水中会缓慢生成 H₂O₂ 和氧气 (O₂), 是一种强氧化剂; 同时, 生成的 Ca²⁺ 还有助于混凝作用^[16]. 此外, CaO₂ 同时还具有漂白、脱臭以及消毒杀菌的作用, 因此, 它被广泛应于农业、水产养殖业以及制药领域^[17]. 以前的研究表明, CaO₂ 可以修复有机微污染的土壤^[18]. 同时, CaO₂ 可以在不同 pH 条件下有效地氧化四氯乙烯^[19]. Zhang 等^[20] 的研究表明, CaO₂ 可以有效去除污泥中的内分泌干扰物 (endocrine disrupting chemicals, EDCs) 并且提高污泥的溶解效率. 此外, CaO₂ 在氧化过程中产生的强碱——Ca(OH)₂ 不仅可以提高污泥的水解效率^[13, 21], 而且可以有效改善污泥的厌氧消化特性^[22].

然而, 采用过氧化钙预调理对污泥脱水性能影响的研究较少, 尤其是调理过程中污泥的絮体形态特性. 本研究的目的在于: 第一, 研究过氧化钙调理对污泥过滤脱水性能的影响; 第二, 深入了解调理过程中污泥絮体形态特性的变化以及反应动力学机制; 第三, 优化 CaO₂ 调理的工艺方法和控制参数, 以期为过氧化钙在污泥处理过程中的应用提供理论支持.

1 材料与与方法

1.1 污泥与试剂来源

本研究所采用的污泥取自北京市北小河再生水厂, 该厂处理规模为 10 万 t·d⁻¹, 采用膜生物反应器 (membrane bio-reactor, MBR) 与臭氧连用工艺. 剩余活性污泥的含水率为 98.3%, 初始 pH 为 6.81, 平均粒径为 58.677 μm, 污泥比阻 (specific resistance to filtration, SRF) 为 1.53 × 10¹³ m·kg⁻¹; 此外, 污泥上清液化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 为 132 mg·L⁻¹, Zeta 电位值为 -14.3.

本研究所采用的试剂均由国药集团化学试剂有

限公司提供. 另外, 除过氧化钙 (CaO₂) 试剂的纯度为 70% 以外, 其余试剂均为分析纯.

1.2 实验方法

1.2.1 CaO₂ 污泥溶解实验

分别取不同剂量的 CaO₂ 于 150 mL 污泥中, 并将盛放污泥的 250 mL 锥形瓶置于水平恒温振荡器中 (25℃ ± 1℃), 在 200 r·min⁻¹ 条件下充分反应 1h. 污泥溶解动力学实验: 取 800 mL 污泥置于 1 L 烧杯中, 并投加 CaO₂, 同时采用悬臂式机械搅拌仪进行充分搅拌反应. 实验在 60 min 内分别取不同的时间间隔进行取样, 并将污泥样品及时进行分离提取, 以免产生实验误差.

1.2.2 污泥溶解性组分的分离提取

将污泥置于 50 mL 离心管中, 在 3 000 r·min⁻¹ 下离心 10 min, 得到污泥上清液组分^[6].

1.2.3 亚铁离子协同 CaO₂ 溶解污泥实验

分别 (以 TSS 计) 取 50 mg·g⁻¹ 的 CaO₂ 于 100 mL 污泥中, 并在此基础之上, 分别同时投加不同剂量的 FeSO₄ 粉末, 使得 Fe²⁺/CaO₂ (摩尔比) 位于 0.05 ~ 1 之间, 在水平恒温振荡器中 (25℃ ± 1℃, 200 r·min⁻¹) 充分反应 1h 后进行样品提取分析.

1.3 分析方法

1.3.1 污泥脱水性能测定

污泥比阻 (SRF) 是表征污泥过滤特性的综合性指标, 它表示单位质量的污泥在一定压力下过滤时单位过滤面积上的阻力. SRF 测定时, 抽滤所采用的真空压力为 0.06 MPa, 并且计算机通过电子天平每隔 2 s 记录一次 50 mL 污泥的过滤体积, 直至 10 min 后停止测定. 同时, 取出滤纸上形成的泥饼, 利用差量法计算含水率. 此外, 比阻计算公式:

$$\text{SRF} = \frac{2pA^2b}{\mu\omega} \quad (1)$$

式中, p 为过滤压力 (kg·m⁻²); A 为过滤面积 (m²); μ 为滤液的动力黏度 (kg·s·m⁻²); ω 为滤过单位体积的滤液在过滤介质上截留的干固体重量 (kg·m⁻³); b 为过滤方程 $t/V = bV + a$ 所代表的直线的斜率, t 为过滤时间 (s); V 为滤液体积 (m³).

$$\theta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, θ 表示污泥含水率, m_1 为抽滤脱水后泥饼质量, m_2 为烘干后泥饼质量.

1.3.2 三维荧光光谱分析

实验采用 Hitachi F-7000 荧光光谱仪对污泥上清液组分的三维荧光光谱 (Three-dimensional

excitation emission matrix, 3DEEM) 进行测定. 激发光源为氙弧灯, 激发波长 E_x 为 200 ~ 400 nm, 发射波长 E_m 为 220 ~ 550 nm, 激发和发射狭缝宽度为 5 nm, 扫描速度为 $12\ 000\ \text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$.

1.3.3 高效体积排阻色谱

高效体积排阻色谱 (HPSEC) 采用 Waters 液相色谱系统, 由 Waters 2487 双波长吸收检测器、Waters 1525 泵组成. 分离所用色谱柱为 Shodex KW 802.5 柱 (Shoko Co., Japan). 流动相为 $5\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸盐缓冲液和 $0.01\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液, 配制后用 $0.22\ \mu\text{m}$ 的膜过滤, 然后超声波脱气 15 min. 流动相流速为 $0.8\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样量为 $200\ \mu\text{L}$. 聚苯乙烯磺酸钠 (PSS) 作为分子量的标准物质, 标线中所用的 PSS 相对分子质量分别为 1 800、4 200、6 500 和 32 000 (Sigma, Aldrich) [23, 24].

1.3.4 其他指标

溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 采用 TOC 分析仪 (TOC-L, SHIMADZU Inc., Japan) 测定. 粒径分析采用马尔文激光粒度仪 (Malvern Mastersizer 2000, Malvern, UK) 测定. 另外, 电镜观测采用 HITACHI SU8020 型场发射扫描电镜, 污泥样品需经过冷冻干燥处理.

2 结果与讨论

2.1 CaO_2 对污泥特性的影响

2.1.1 CaO_2 投加量对污泥脱水性能的影响

通过图 1(a) 可以看出, 随着过氧化钙投加量的增加, SRF 呈现先下降后上升的趋势, 同样, 抽滤后泥饼的含水率与 SRF 的变化相同. 当过氧化钙的投加量 (以 TSS 计, 下同) 为 $20\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 污泥 SRF 达到最低, 为 $1.28 \times 10^{13}\ \text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$; 此时, 泥饼的含水率也达到最低的 86.31%. 此外, 结合图 1(b), 污泥絮体的平均粒径分布随着投加量的上升, 起初出现了较为明显的增长, 在投加量为 $20\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 絮体粒径出现明显的峰值, 随后在投加量为 $30\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 处趋于平缓. 有研究表明, 投加无机混凝剂导致污泥颗粒迅速聚集形成较大的絮体是由于吸附架桥和电中和的共同作用 [16]. 然而 CaO_2 在氧化裂解污泥的同时, 生成的 Ca^{2+} 又加速了污泥絮体的团聚, 导致絮体的粒径出现了明显的增长. 随后污泥粒径出现的明显下降并趋于平稳, 可能是由于随着 CaO_2 投加量的增多, 其氧化裂解作用逐渐增强使得絮体裂解程度加剧而导致的, 并在氧化混凝作用达到平衡的时候, 污泥粒径逐渐趋于稳定. 因此, 当 CaO_2 的

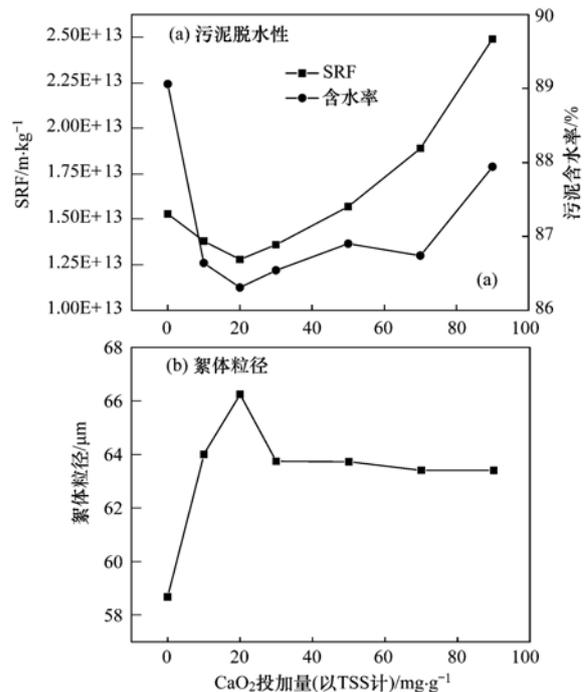


图 1 CaO_2 投加量对污泥脱水性和絮体粒径的影响

Fig. 1 Effect of CaO_2 dosage on sludge dewaterability and floc size

投加量为 $20\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 污泥的过滤脱水效果最佳.

2.1.2 CaO_2 投加量对污泥上清液组分的影响

如图 2(a) 所示, 污泥上清液的有机物浓度随着 CaO_2 的投加量出现了明显的上升, 从 $18.77\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $43.65\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 同时, 由图 2(b) 可知, 污泥上清液组分的相对分子质量分布出现了 5 个峰值, 分别为 800、1 500、2 200、3 000 和 50 000. 在这些分子量中, 除 3 000 所对应的峰值无明显变化以外, 其余 4 个峰值均出现了较为明显的上升. 根据 Lyko 等 [25] 的分类方法, 污泥胞外聚合物的分子量可以大致分为 3 个部分: 蛋白质和多糖类等大分子有机物大分子组分 ($> 5\ 000$)、中分子量组分 ($1\ 000 \sim 5\ 000$) 和分子骨架物质等低分子量组分 ($< 1\ 000$). 因此, CaO_2 投加量的增加使得污泥中大分子有机物裂解并释放至污泥上清液中, 从而导致了其 DOC 浓度的上升. 此外, Kiss 等 [26] 的研究表明, 腐殖酸类有机物的平均分子量在 $100 \sim 800$ 之间. 因此, 污泥在过氧化钙预调理之后, 其上清液组分中并未出现腐殖酸类物质.

2.1.3 CaO_2 溶解污泥的动力学特性分析

由图 3 可知, 随着反应时间的变化, 污泥上清液 DOC 含量出现了明显的上升, 最终从 $29.54\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $46.62\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这可能是由于经过过氧化钙调理后, 污泥大分子得到了有效的裂解所导致 [20]. 反应动力学方程如下:

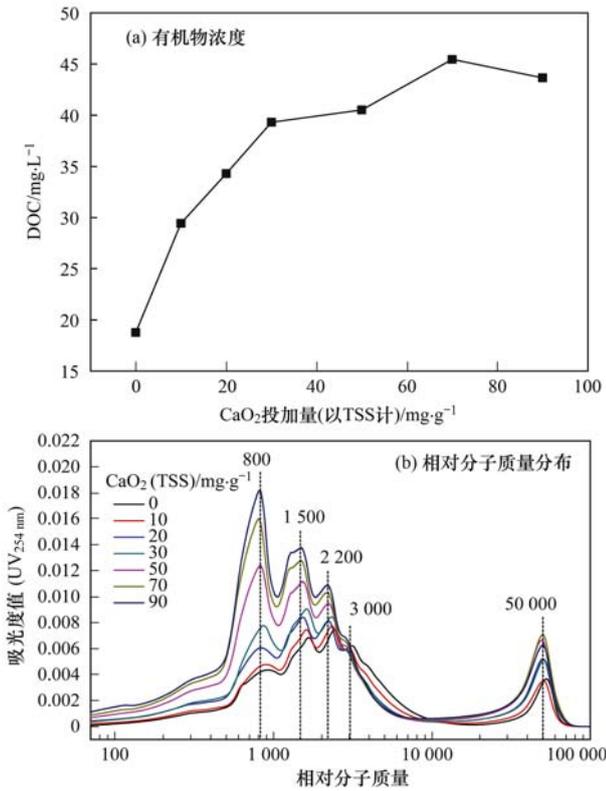


图2 CaO₂投加量对污泥上清液有机物浓度和相对分子质量分布的影响

Fig. 2 Effect of CaO₂ dosage on organic concentration and relative molecular weight distribution in sludge supernatant

$$-\frac{dc}{dt} = k_1 \longrightarrow k_1 t = -(c - c_0) + b_1 \quad (3)$$

$$-\frac{dc}{dt} = k_2 c \longrightarrow k_2 t = -\ln(c/c_0) + b_2 \quad (4)$$

$$-\frac{dc}{dt} = k_3 c^2 \longrightarrow k_3 t = \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{c_0}\right) + b_3 \quad (5)$$

$$-\frac{dc}{dt} = k_4 c^3 \longrightarrow k_4 t = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{c_0^2}\right) + b_4 \quad (6)$$

式(3)~(6)分别表示0、1、2和3级反应动力学方程。式中, c 表示污泥上清液有机物浓度, k_n ($n=1, 2, 3, 4$) 分别代表污泥裂解速率常数, 并且均拥有各自不同的量纲; b_n ($n=1, 2, 3, 4$) 分别表示每个

表1 CaO₂溶解污泥不同级数反应动力学拟合

Table 1 Different kinetic curve fitting of CaO₂ dissolution in sludge

级数	速率方程	相关系数(R^2)	速率常数
0	$c - c_0 = 15.2t + 3.1601$	0.925	$15.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
1	$\ln(c/c_0) = 0.392t + 0.1068$	0.878	0.392 h^{-1}
2	$(1/c) - (1/c_0) = 0.0103t + 0.0035$	0.820	$0.0103 \text{ mg}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{h}^{-1}$
3	$(1/c^2) - (1/c_0^2) = 0.00054t + 0.00022$	0.753	$0.00054 \text{ mg}^{-2} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{h}^{-1}$

2.2 Fe²⁺协同CaO₂调理对污泥特性的影响

2.2.1 Fe²⁺协同CaO₂调理对污泥脱水性以及上清液有机物浓度的影响

方程的积分常数。通过分别构建 $c-t$ 、 $\ln(c/c_0)-t$ 、 $\frac{1}{c}-t$ 以及 $\frac{1}{c^2}-t$, 利用拟合出的斜率和截距即可求得 k 和 b 值(见表1)。由此可见, CaO₂ 溶解污泥遵循准零级反应动力学, 拟合相关系数达 0.925, 反应速率常数为 $15.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

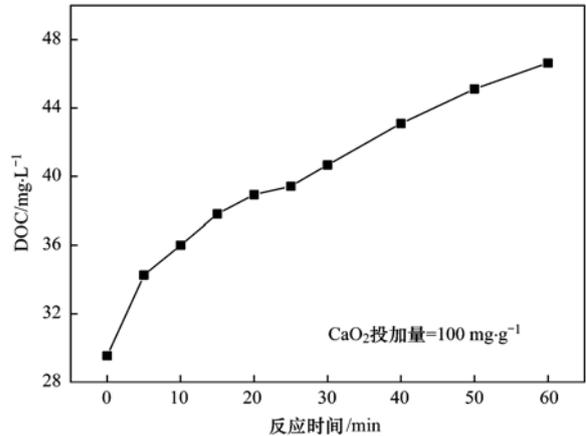
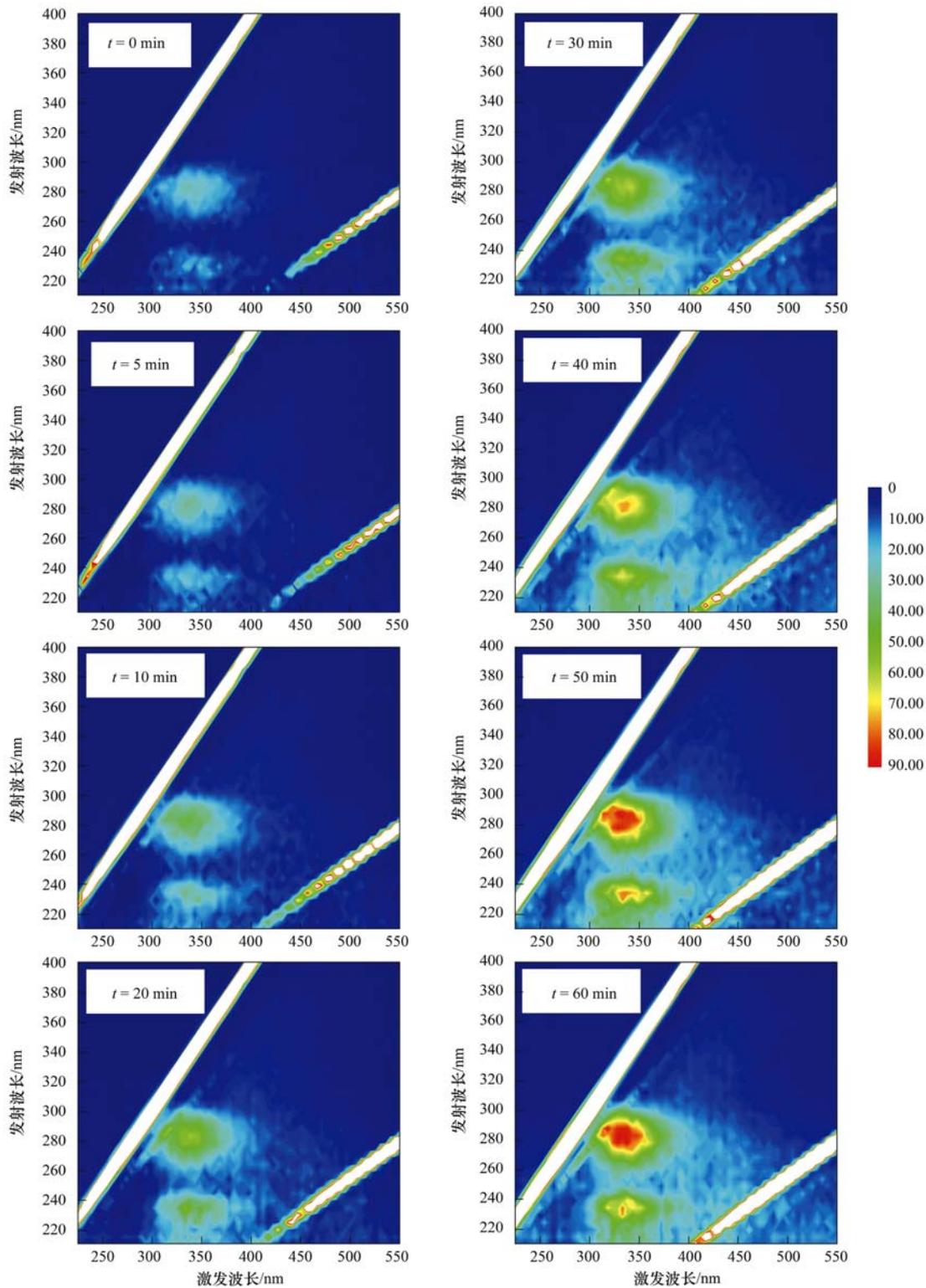


图3 污泥上清液有机物含量随反应时间的变化
Fig. 3 Variation of organic concentration in sludge supernatant with reaction time

三维荧光光谱分析由于其具有较高的灵敏度和选择性被广泛应用于各种水质中有机物质的检测^[27]。有研究表明, 三维荧光光谱被分为5大区域, 分别为: 色氨酸类蛋白、芳香类蛋白 I、芳香类蛋白 II、腐殖酸和富里酸^[28]。图4为污泥上清液的荧光光谱, 图谱中分别在色氨酸类蛋白($E_x/E_m = 280/335 \text{ nm}$)和芳香类蛋白($E_x/E_m = 230/335 \text{ nm}$)的位置出现两个峰值, 而峰值随时间出现了明显的上升, 并表现出来与DOC相同的趋势, 分别从29.25和20.56增至87.47和78.33(见图5)。不难推断, CaO₂ 的加入导致了污泥絮体的裂解及有机物的释放。然而, 光谱中并未检测到腐殖酸以及富里酸类物质的荧光峰, 说明CaO₂ 预裂解并不能使得污泥絮体裂解释放此类小分子物质, 而这也证实了之前文中HPSEC的分析结果。

如图6所示, 污泥的过滤脱水性能随着Fe²⁺和CaO₂比例的升高出现了明显的改善, SRF从 $4.55 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $1.54 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而滤后泥饼的含

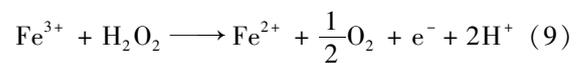
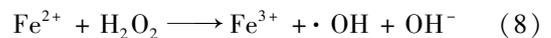
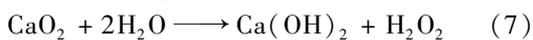


样品均稀释 50 倍

图 4 CaO₂ 处理污泥上清液荧光光谱随反应时间的变化

Fig. 4 Variation in fluorescence spectrum of sludge supernatant after CaO₂ addition with reaction time

水率也从 92.44% 降至 83.23%；与此同时，污泥上清液有机物浓度却出现了较为明显的上升，由 38.64 mg·L⁻¹ 增至 55.96 mg·L⁻¹。根据公式(7)~(9)：



这可能是由于 Fe²⁺ 的加入使得反应构成了芬

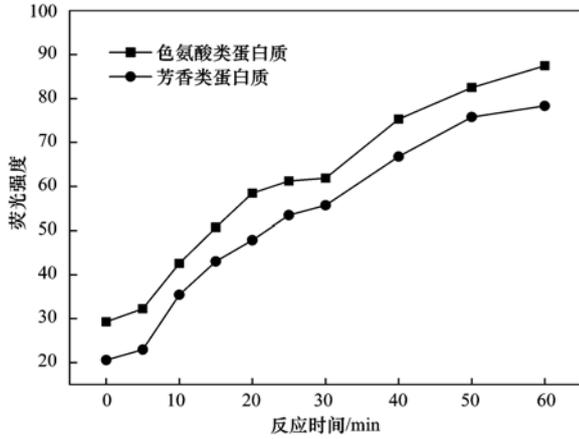


图 5 CaO₂ 处理后上清液荧光强度随反应时间的变化

Fig. 5 Variation of fluorescent intensities in EEM under CaO₂ oxidation with reaction time

顿(Fenton)体系^[20],其过程中产生的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)具有较强的氧化特性,从而强化了污泥的裂解过程.同时,反应过程中产生的 Fe^{3+} 会在压缩双电层的作用下,将絮体变得更为密实,有助于自由水的去除^[6].因此,随着 $\text{Fe}^{2+}/\text{CaO}_2$ (摩尔比)增大,污泥过滤脱水性能得到了进一步的改善.

2.2.2 Fe^{2+} 协同 CaO_2 调理对污泥絮体形态的影响

通过图 7 可以看出污泥絮体在 FE-SEM 下的具

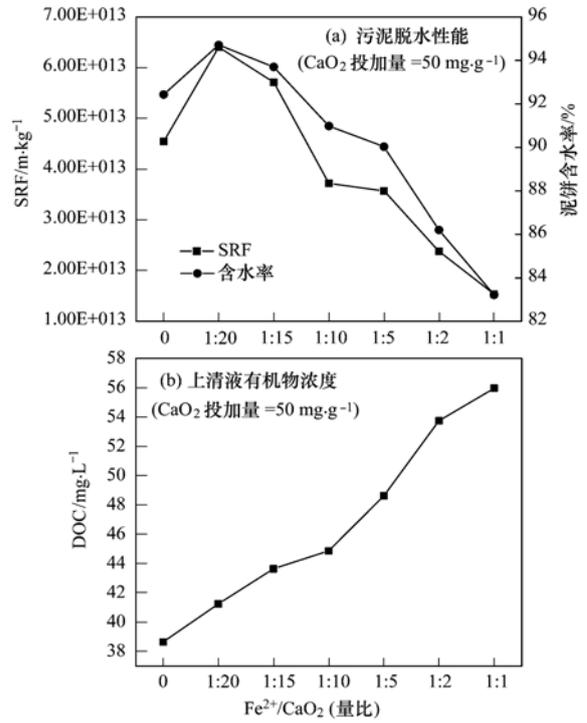
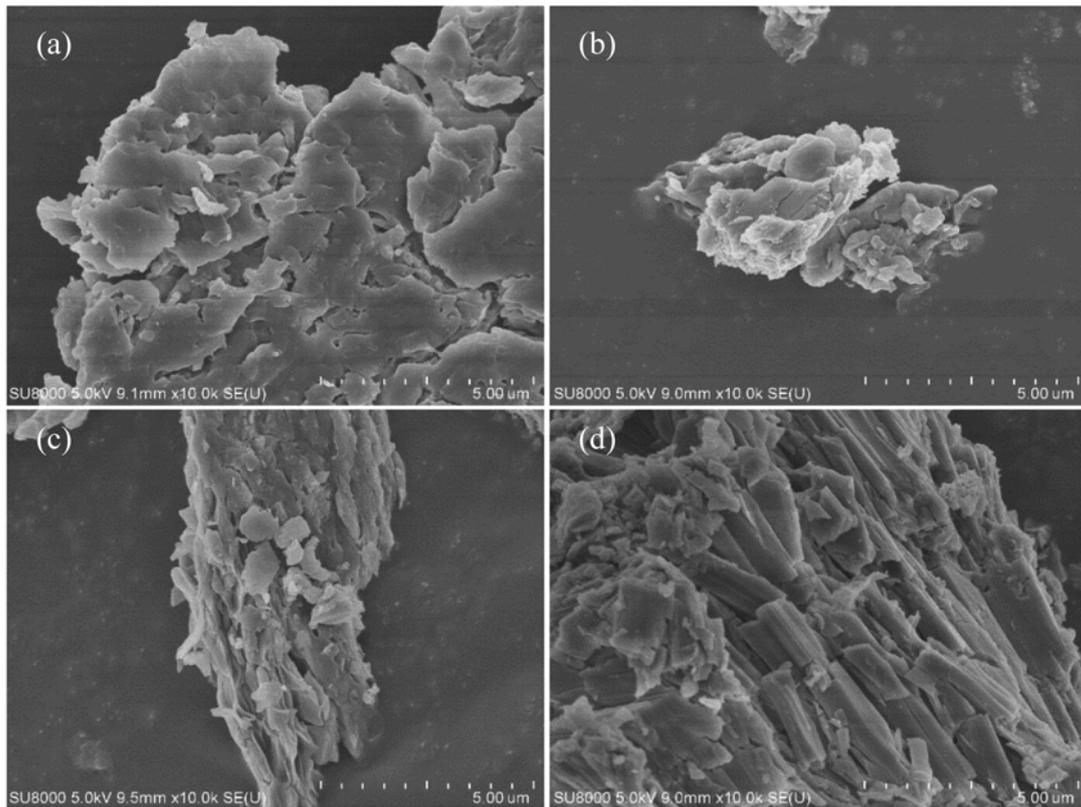


图 6 Fe^{2+} 与 CaO_2 不同摩尔比对污泥脱水性能和上清液有机物浓度的影响

Fig. 6 Effects of different molar ratios of Fe^{2+} and CaO_2 on sludge dewaterability and organic concentration in supernatant



(a) 原泥; (b) $\text{CaO}_2 = 20 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; (c) $\text{CaO}_2 = 90 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; (d) $\text{Fe}^{2+}/\text{CaO}_2$ (摩尔比) = 1:1

图 7 电镜下的污泥絮体(10 000 倍)

Fig. 7 Sludge floc morphology observed by FE-SEM (magnified by 10 000 times)

体形态, 未经处理的污泥絮体[见图 7(a)]表面相对比较平滑, 而经过氧化钙处理后的污泥絮体[见图 7(b)和 7(c)]结构则表现出疏松、孔隙分布复杂等特点, 并且高 CaO_2 投加量的污泥絮体结构越破碎分散. 这也就不难推断, 污泥絮体在 CaO_2 的调理下裂解作用明显; 此外, 通过图 7(d)可以看出, 污泥絮体经过 Fe^{2+} 协同 CaO_2 调理之后, 明显出现了破碎絮体紧密团聚的现象, 其多表现为体积较小而致密并且类似于结晶的碎片, 而这与文中先前所提到的污泥絮体重建过程相吻合.

3 结论

(1) 经过 CaO_2 处理之后, 污泥的过滤脱水性能先改善后恶化, 当投加量(以 TSS 计)为 $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 污泥的过滤脱水效果达到最佳, 这可能是由于 CaO_2 兼具氧化和混凝的双重作用.

(2) 经过 CaO_2 调理过后, 污泥絮体结构变得疏松破碎, 其上清液有机物浓度出现了明显的上升, 证明污泥得到了有效裂解.

(3) 污泥溶解反应过程遵循零级反应动力学模型, 反应速率常数为 $15.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

(4) 相比 CaO_2 单一处理, Fe^{2+} 可以使得污泥中的大分子有机物进一步裂解释放, 并且可以有效强化 CaO_2 处理污泥的过滤脱水性能, 这可能是由于反应体系中产生的羟基自由基和 Fe^{3+} 的共同作用所致.

参考文献:

- [1] Kim Y K, Bae J H, Oh B K, *et al.* Enhancement of proteolytic enzyme activity excreted from *Bacillus stearothermophilus* for a thermophilic aerobic digestion process [J]. *Bioresource Technology*, 2002, **82**(2): 157-164.
- [2] Wei Y S, van Houten R T, Borger A R, *et al.* Comparison performances of membrane bioreactor and conventional activated sludge processes on sludge reduction induced by Oligochaete [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(14): 3171-3180.
- [3] Low E W, Chase H A, Milner M G, *et al.* Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process [J]. *Water Research*, 2000, **34**(12): 3204-3212.
- [4] Vaxelaire J, Cézac P. Moisture distribution in activated sludges: a review [J]. *Water Research*, 2004, **38**(9): 2215-2230.
- [5] Beauchesne I, Ben Cheikh R, Mercier G, *et al.* Chemical treatment of sludge: in-depth study on toxic metal removal efficiency, dewatering ability and fertilizing property preservation [J]. *Water Research*, 2007, **41**(9): 2028-2038.
- [6] Niu M Q, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Correlation of physicochemical properties and sludge dewaterability under chemical conditioning using inorganic coagulants [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **144**: 337-343.
- [7] Zhang W J, Xiao P, Liu Y Y, *et al.* Understanding the impact of chemical conditioning with inorganic polymer flocculants on soluble extracellular polymeric substances in relation to the sludge dewaterability [J]. *Separation And Purification Technology*, 2014, **132**: 430-437.
- [8] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [9] Neyens E, Baeyens J, Dewil R, *et al.* Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, **106**(2-3): 83-92.
- [10] Tokumura M, Sekine M, Yoshinari M, *et al.* Photo-Fenton process for excess sludge disintegration [J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42**(4): 627-633.
- [11] Liu H, Yang J K, Zhu N R, *et al.* A comprehensive insight into the combined effects of Fenton's reagent and skeleton builders on sludge deep dewatering performance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **258-259**: 144-150.
- [12] Neyens E, Baeyens J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **98**(1-3): 33-50.
- [13] 朱建平, 彭永臻, 李晓玲, 等. 碱性发酵污泥脱水性能的变化及其原因分析 [J]. *化工学报*, 2013, **64**(11): 4210-4215.
Zhu J P, Peng Y Z, Li X L, *et al.* Change and mechanism of sludge dewaterability during alkaline fermentation [J]. *CIESC Journal*, 2013, **64**(11): 4210-4215.
- [14] Chen Z, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Enhancement of activated sludge dewatering performance by combined composite enzymatic lysis and chemical re-flocculation with inorganic coagulants: kinetics of enzymatic reaction and re-flocculation morphology [J]. *Water Research*, 2015, **83**: 367-376.
- [15] Qian Y J, Zhou X F, Zhang Y L, *et al.* Performance and properties of nanoscale calcium peroxide for toluene removal [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(5): 717-723.
- [16] Higgins M J, Novak J T. Dewatering and settling of activated sludges: the case for using cation analysis [J]. *Water Environment Research*, 1997, **69**(2): 225-232.
- [17] Ma Y, Zhang B T, Zhao L X, *et al.* Study on the generation mechanism of reactive oxygen species on calcium peroxide by chemiluminescence and UV-visible spectra [J]. *Luminescence*, 2007, **22**(6): 575-580.
- [18] Ndjou'ou A C, Cassidy D. Surfactant production accompanying the modified Fenton oxidation of hydrocarbons in soil [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(9): 1610-1615.
- [19] Northup A, Cassidy D. Calcium peroxide (CaO_2) for use in modified Fenton chemistry [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(3): 1164-1170.
- [20] Zhang A, Wang J, Li Y M. Performance of calcium peroxide for removal of endocrine-disrupting compounds in waste activated sludge and promotion of sludge solubilization [J]. *Water Research*, 2015, **71**: 125-139.
- [21] Wu H Y, Gao J Y, Yang D H, *et al.* Alkaline fermentation of primary sludge for short-chain fatty acids accumulation and mechanism [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **160**(1): 1-7.

- [22] Chen Y G, Jiang S, Yuan H Y, *et al.* Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs[J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 683-689.
- [23] Wang D S, Xing L N, Xie J K, *et al.* Application of advanced characterization techniques to assess DOM treatability of micro-polluted and un-polluted drinking source waters in China[J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(1): 39-45.
- [24] Chow C W K, Fabris R, van Leeuwen J, *et al.* Assessing natural organic matter treatability using high performance size exclusion chromatography [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(17): 6683-6689.
- [25] Lyko S, Al-Halbouni D, Wintgens T, *et al.* Polymeric compounds in activated sludge supernatant-characterisation and retention mechanisms at a full-scale municipal membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2007, **41**(17): 3894-3902.
- [26] Kiss G, Tombácz E, Varga B, *et al.* Estimation of the average molecular weight of humic-like substances isolated from fine atmospheric aerosol [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(27): 3783-3794.
- [27] Henderson R K, Baker A, Murphy K R, *et al.* Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: a review [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 863-881.
- [28] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-Emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)