ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第4期
2014年4月15日

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_{10} 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,崔骁勇,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,范娴, 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(*Vallisneria natans*)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)
循环流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,王风贺,纪菅雪,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,席劲瑛,庞宇辰,胡洪营(1326)
二级处理出水的 UV-TiO_2 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,任伯帜(1332)
水中 C_{60} 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,顾运, 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^{2+} 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_2O_2 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群多样性的比较研究 …… 董慧峪,季民(1421)
锰氧化菌 *Aminobacter* 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,蒋轶锋(1428)
1 株铁基质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 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 …… 徐冰洁,高品,薛罡,何梦琦,吴凡(1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解菲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 …… 王娓敏,邓珀,邹华,梁婵娟(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,李伯芩,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,赵赟,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^+ 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^{2+} 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_3^- 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)

化学合成施氏矿物与 H_2O_2 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*
(南京农业大学资源与环境科学学院环境工程系,南京 210095)

摘要: 选择高效快速的处理方法来降解垃圾渗滤液中高浓度有机污染物具有重要的实际意义. 本研究采用化学合成施氏矿物/H_2O_2/UV 法,探究了施氏矿物添加量、$V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)等对垃圾渗滤液色度、TOC、COD 去除效果的影响. 结果表明,渗滤液色度、TOC、COD 去除率随施氏矿物添加量的增加均呈先显著上升后逐渐稳定的趋势,在最佳添加量 12 g·L^{-1}时,色度、TOC 去除率随着 $V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)的增大均有所提高,而当 $V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)大于 2 时,COD 去除率受 H_2O_2影响反而呈下降趋势,最佳去除率为 44.9%; 另外,高强度紫外光更有利于施氏矿物/H_2O_2光化学氧化污染物,在 500 W 条件下,最佳起始 pH = 2.5 的渗滤液光化学处理 2.5 h 后,色度、TOC 和 COD 去除率分别为 90.0%、78.8% 和 52.6%; 同时,研究发现常温条件更有利于施氏矿物/H_2O_2/UV 法处理垃圾渗滤液,当温度大于 25℃ 时,COD 去除率呈逐渐下降趋势. 对照试验表明,与传统均相 Fenton 反应相比,施氏矿物/H_2O_2法有利于渗滤液色度的去除.

关键词:施氏矿物; H_2O_2; 光化学; 垃圾渗滤液; 异相 Fenton
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)04-1407-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.04.029

Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H_2O_2

WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, CUI Chun-hong, ZHOU Li-xiang
(Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: It is practically important that high concentrations of organic pollutants in landfill leachate were degraded by a rapid and efficient approach. The influence of operating conditions such as schwertmannite dosage, $V(H_2O_2)/m$(schwertmannite) ratio on the degradation efficiency of color, TOC and COD contents of landfill leachate, was investigated by using the schwertmannite/H_2O_2/UV process. It was demonstrated that the color, TOC and COD removal efficiencies increased significantly with the increase in schwertmannite dosage, and then were approximately stable. However, COD removal efficiency declined because of the presence of the residual H_2O_2 when $V(H_2O_2)/m$(schwertmannite) was greater than 2, and the best removal efficiency of COD was 44.9%. Furthermore, high-intensity ultraviolet was more conducive to eliminate pollutants through photochemical oxidation with schwertmannite/H_2O_2. The color, TOC and COD removal efficiencies were 90.0%, 78.8% and 52.6% respectively after 2.5 hours of photochemical degradation, with UV-500 W under optimal initial pH = 2.5; meanwhile, this study found that it was beneficial to the photochemical degradation of leachate at room temperature via the schwertmannite/H_2O_2/UV process, and COD removal efficiency declined gradually when the temperature was higher than 25℃. Controlled trials showed that the schwertmannite/H_2O_2 method was conducive to the removal of color compared with the traditional homogeneous Fenton reaction.

Key words: schwertmannite; H_2O_2; photochemical; landfill leachate; heterogeneous Fenton

垃圾渗滤液是一种含有大量病原微生物和有毒有害物质的高浓度有机废水,对环境危害较大[1~3]. 目前国内垃圾渗滤液主要采用生化加膜过滤来处理,但渗滤液高浓度氨氮对生物处理系统有较大的冲击和抑制作用,且膜过滤后的浓缩液处理问题仍是难点. 因此,在生化处理前采用物化法,如混凝沉淀[4]、活性炭吸附[5]、化学氧化[6,7]等对垃圾渗滤液进行预处理有利于后续的生化处理的进行.

高级氧化技术(advanced oxidation processes, AOPs)是指在氧化剂、光辐射、高温高压等条件下将难降解有机污染物氧化为 CO_2、H_2O 等简单的无机物的技术[8]. Fenton 反应是一种常见的可高效去除有机污染物的高级氧化技术[9],但传统均相 Fenton 反应不能充分矿化有机物,中间产物易与 Fe^{3+} 结合形成络合物,或与 · OH 的生成机制发生

收稿日期: 2013-08-26; **修订日期**: 2013-11-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(21277071,40930738)
作者简介: 王鹤茹(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为固体废弃物处理处置与资源化, E-mail: 2011103083@njau.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

竞争,另外产生的氢氧化铁等絮状物沉降性能较差,大量含铁污泥需要另行处理[10,11],这使得该方法的使用受到限制. 为克服传统 Fenton 反应的缺点,通常结合紫外光来提高其效率,这样不仅能使 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 保持良好的循环反应,且使有机物矿化程度更充分,有机物在紫外光作用下也可部分降解. 另外有文献报道,在光照条件下,Fenton 反应在去除污染物的同时,含铁污泥的产生量会大幅度减少[12].

利用 Fe^{3+} 盐溶液、铁的氧化矿物(如赤铁矿、针铁矿等)、铁锰氧化物同样可使 H_2O_2 分解产生 ·OH,达到降解有机物的目的. 有研究表明,以黄铵铁矾/H_2O_2、β-FeOOH/H_2O_2 等结合紫外光照的异相 Fenton 反应能较好地降解偶氮染料甲基橙[13]; 在有机酸的协同作用下,施氏矿物(Schwertmannite)/UV 的异相 Fenton 反应也可以有效降解孔雀石绿[14]. 施氏矿物是一种结晶度较差、形貌特殊的亚稳态的次生羟基硫酸盐高铁矿物[15],其基本化学式为 $Fe_8O_8(OH)_{8-2x}SO_x$,x 在 1 ~ 1.75 之间[16]. 推测利用施氏矿物/H_2O_2 来处理垃圾渗滤液不会产生大量 $Fe(OH)_3$ 絮状沉淀且反应温和. 因此,本研究对施氏矿物/H_2O_2/UV 法降解垃圾渗滤液中污染物的反应影响因素进行分析,同时比较与传统均相 Fenton/UV 的差异,旨在为提高施氏矿物/H_2O_2 对垃圾渗滤液光化学处理效率提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

渗滤液取自南京市轿子山生活垃圾填埋场,样品采用高速冷冻离心机(10 000 r·min^{-1},10 min)去除悬浮性颗粒,并及时测定基本指标(见表 1),然后保存于 4℃冰箱中待用[17].

表 1 供试垃圾渗滤液基本性质

Table 1 Prelimanary properties of the selected landfill leachate

项目	测定值
色度	50 倍
pH	8.5
电导率	17 250 μS·cm^{-1}
COD	11 306 mg·L^{-1}
TOC	457.9 mg·L^{-1}
氨氮	770 mg·L^{-1}
总磷	1.33 mg·L^{-1}
菌落总数	1.6×10^9 CFU·mL^{-1}
总大肠菌群	1.5×10^6 cells·mL^{-1}
耐热大肠菌群	5.0×10^4 cells·mL^{-1}

1.2 化学合成施氏矿物的制备

在 1 L 的三角瓶中加入 494 mL 去离子水和 11.12 g $FeSO_4\cdot7H_2O$,摇晃使其完全溶解,通过蠕动泵以 0.3 mL·min^{-1} 速度将 6 mL H_2O_2(30%)缓慢滴加到该溶液中,同步采用磁力搅拌器持续搅拌. 滴加完毕后,将上述混合液置于 180 r·min^{-1} 往复式摇床中振荡. 24 h 后用定性滤纸收集生成矿物,并用酸化(pH = 2.0)和中性去离子水(pH = 6.8)先后分别冲洗 3 次,50℃下烘干待用. 本课题组前期研究结果表明,该方法合成施氏矿物为唯一产物,不含其它杂质[18],经测定其基本理化性质如表 2 所示.

表 2 化学法合成施氏矿物特征

Table 2 Characteristics of schwertmannite produced by chemical method

外观颜色	Fe/S	化学组成	比表面积/m^2·g^{-1}	粒径/μm	孔结构
黄棕色	4.17	$Fe_8O_8(OH)_{4.98}(SO_4)_{1.92}$	4.65	0.6 ~ 0.8	不明显

1.3 光化学反应试验

本试验采用单一因素逐步优化法,分别先后研究施氏矿物添加量、$V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)、光照强度、起始 pH、反应时间、反应温度对光化学法处理垃圾渗滤液的影响.

具体试验方法:在若干有效容积约 50 mL 的石英反应管中分别放置一枚磁力搅拌子,并添加施氏矿物(根据试验设计确定添加量),加入预先调好 pH 的垃圾渗滤液 25 mL,以及相应体积的 H_2O_2[根据 $V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)确定各处理 H_2O_2 的添加量],最后将石英反应管放置于 XPA-Ⅱ型光化学反应器中,开启磁力搅拌,根据试验需求放置灯源、设置反应时间以及反应温度. 待反应结束后,用滤纸过滤并收集滤液测定色度,用 10 mol·L^{-1} NaOH 或 1 mol·L^{-1} H_2SO_4 将滤液 pH 调至初始值 8.5 后测定 TOC 和 COD. 每个试验设置 3 个重复.

各因素设置梯度如下:①施氏矿物添加量:0、2、4、8、12、16、20 g·L^{-1}; ②$V(H_2O_2)/m$(施氏矿物):0.25、0.5、1.0、2.0、3.0、5.0 mL·g^{-1}; ③光照强度:100、300、500 W; ④起始 pH:1、2、2.5、3、4、5、7、9; ⑤反应时间:0、0.25、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 h; ⑥反应温度:15、25、40、60、80℃.

对照试验:根据上述优化试验结果确定最佳反

应条件，分别在有和无紫外光环境下观察施氏矿物、H_2O_2、传统均相 Fenton 反应对垃圾渗滤液色度、TOC 和 COD 去除效果的变化，并与施氏矿物/H_2O_2 共存体系的异相 Fenton 反应进行比较. 传统均相 Fenton 反应中，$FeSO_4 \cdot 7H_2O$的添加量按本试验化学合成施氏矿物[$Fe_8O_8(OH)_{4.98}(SO_4)_{1.92}$]中 Fe 元素的质量百分比进行换算，确定 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$添加量约为 31.44 $g \cdot L^{-1}$，其它条件参数一致.

1.4　测定方法

分别使用雷磁 pHS-3C 精密 pH 计(中国上海)和雷磁 DDB-303A 便携式电导率仪(中国上海)测定 pH 和电导率；色度采用稀释法测定[19]；COD 采用重铬酸钾-分光光度法测定[20]；TOC 含量测定所用仪器是日本 SHIMADZU 公司生产的 5000A 型 TOC 测定仪.

2　结果与讨论

2.1　施氏矿物添加量对光化学法处理垃圾渗滤液的影响

由图 1 可知，当 $V(H_2O_2)/m$(施氏矿物) = 1.5 时，随着施氏矿物添加量的增加，垃圾渗滤液色度、TOC、COD 的去除率均呈逐渐上升趋势，并分别在 4、12、12 $g \cdot L^{-1}$时基本达到稳定状态，此时，各指标去除率分别为 82.2%、37.2%、70.4%. 分析认为，有机污染物被吸附在施氏矿物表面后，与 $\equiv Fe^{\text{Ⅲ}}$ 形成 $\equiv Fe^{\text{Ⅲ}}$-RH，在紫外光下，$\equiv Fe^{\text{Ⅲ}}$ 与 H_2O_2 发生一系列光化学反应，如公式(2)～(7)所示[13,21]，该过程产生了大量羟基自由基(·OH)，可直接将难降解污染物氧化为简单物质[11]. 而由公式(2)～(7)可知，提高施氏矿物的添加量可增加 · OH 的产生量，但反应过程中产生的 $\equiv Fe^{\text{Ⅱ}}$ 也会与污染物争夺 · OH，因此，施氏矿物添加量与污染物去除率并非呈线性关系，正如图 1 所示，当施氏矿物添加量大于 12 $g \cdot L^{-1}$时，污染物去除率上升趋势并不明显.

$$\equiv Fe^{\text{Ⅲ}} + RH \rightarrow Fe^{\text{Ⅲ}}\text{-}RH \quad (1)$$

$$\equiv Fe^{\text{Ⅲ}} + H_2O_2 \rightarrow \equiv Fe^{\text{Ⅲ}}(H_2O_2) \quad (2)$$

$$\equiv Fe^{\text{Ⅲ}} + (H_2O_2) \parallel \xrightarrow{h\nu} (\equiv Fe^{\text{Ⅱ}}O_2H^*) + H^+ \quad (3)$$

$$(\equiv Fe^{\text{Ⅱ}}O_2H^*) \rightarrow \equiv Fe^{\text{Ⅱ}} + O_2H^* \quad (4)$$

$$O_2H^* \longrightarrow H^+ + O_2^{*-} \quad (5)$$

$$\equiv Fe^{\text{Ⅲ}} + O_2H^*/O_2^{*-} \rightarrow \equiv Fe^{\text{Ⅱ}} + H_2O/OH^- \quad (6)$$

$$\equiv Fe^{\text{Ⅱ}} + H_2O_2 \xrightarrow{h\nu} \equiv Fe^{\text{Ⅲ}} + OH^- + \cdot OH \quad (7)$$

$$\equiv Fe^{\text{Ⅲ}}\text{-}RH + \cdot OH \rightarrow \equiv Fe^{\text{Ⅲ}} + CO_2 + H_2O \quad (8)$$

$$H_2O_2 + \cdot OH \longrightarrow HO_2 \cdot + H_2O \quad (9)$$

式中，“ ≡ ”表示施氏矿物表面.

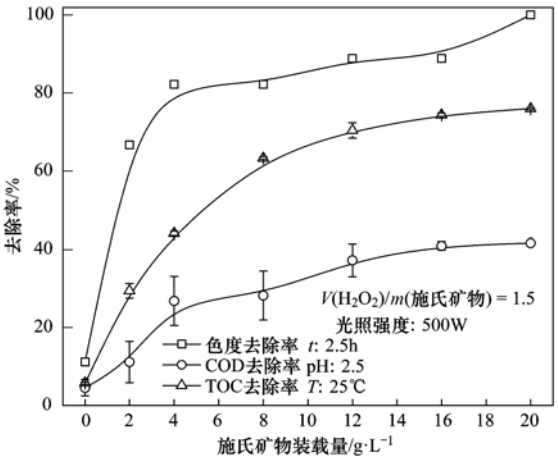

图 1　施氏矿物添加量对光化学法降解渗滤液污染物的影响

Fig. 1　Effect of schwertmannite loadage on photochemical degradation of pollutants in landfill leachate

2.2　$V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)对光化学法处理垃圾渗滤液的影响

当施氏矿物添加量为 12 $g \cdot L^{-1}$时，H_2O_2 滴加量对垃圾渗滤液色度、TOC 和 COD 的去除率均有不同程度影响(图 2). 例如，$V(H_2O_2)/m$(施氏矿物) <2.0 时，色度、TOC 和 COD 的去除率分别从 0.25 时的 70.0%、59.0% 和 30.5% 上升到 2 时的 96.0%、79.6% 和 44.9%，此时体系中发生的主要反应为公式(2)～(8)；当 $V(H_2O_2)/m$(施氏矿物) >2.0 时，色度以及 TOC 去除率变化幅度较小，而测得的 COD 去除率反而变小. 这是因为，当 $V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)过高时，相对而言，施氏矿物处于一种过饱和状态，多余的 H_2O_2 将和前期产生的·OH发生副反应而阻止·OH对污染物的进一步降解[公式(9)][22,23]. 同时，由于 $K_2Cr_2O_8$ 对剩余 H_2O_2 的氧化作用而使得测定 COD 值偏高[24].

2.3　光照对光化学法处理垃圾渗滤液的影响

紫外光照可以促进 Fenton 反应的进行而产生更多的具有强氧化性的 ·OH[12]，在异相 Fenton 反应中亦是如此. 如图 3 所示，当施氏矿物添加量为 12 $g \cdot L^{-1}$，$V(H_2O_2)/m$(施氏矿物) = 2.0 时，紫外光照越强，污染物去除率越高，与 100 W 紫外光照相

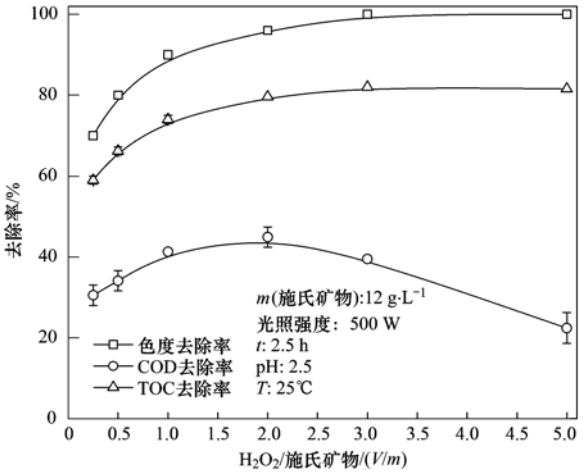

图 2 $V(H_2O_2)/m$(施氏矿物)对光化学法降解渗滤液污染物的影响

Fig. 2 Effect of $V(H_2O_2)/m$ (schwertmannite) on photochemical degradation of pollutants in landfill leachate

比,在 500 W 条件下渗滤液 TOC 和 COD 去除率分别提高了 17.4% 和 24.7%. 产生这一现象的原因可能是高强度紫外光照有利于反应(3)、(7)的进行,产生更多的·OH参与后续反应.

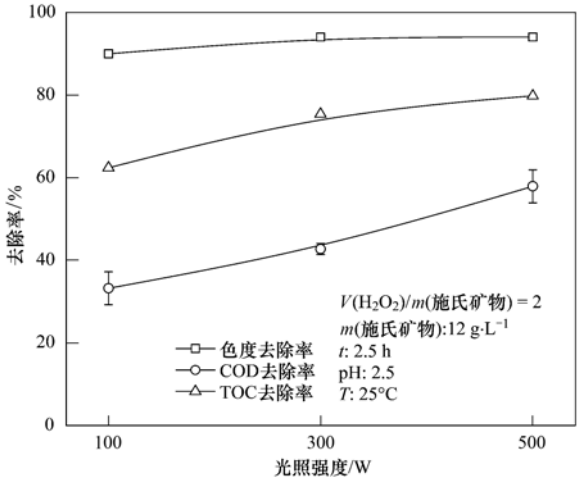

图 3 光照强度对光化学法降解渗滤液污染物的影响

Fig. 3 Effect of light intensity on photochemical degradation of pollutants in landfill leachate

2.4 起始 pH 对光化学法处理垃圾渗滤液的影响

传统 Fenton 反应对起始 pH 的要求较高,仅在酸性条件下(如 pH 2~3)才对污染物具有较高去除效果[25,26]. 这是由于中性条件下,溶解态铁离子(Fe^{2+}、Fe^{3+})沉淀使得均相 Fenton 反应终止. 由图 4 可以看出,pH 为 2.5~5 时渗滤液色度、TOC 和 COD 去除率均处于较高水平,这是由于异相 Fenton 体系中施氏矿物以缓释的方式释放 $\equiv Fe^{II}$ [公式(6)],这一特点使其高效率 pH 范围得以拓宽. 而当 pH >5 时,施氏矿物表面 Zeta 从正电荷向负电荷转变[27],使得负电性较强的垃圾渗滤液污染物难以在其表面吸附降解,且 pH 越高,效果越差[28]. 另外,在 pH <2 的体系下,由于施氏矿物部分溶解或其结构发生改变,使得 TOC 和 COD 去除率变小,且因为体系中存在 Fe^{3+} 而导致渗滤液色度去除率降低. 因此,在 pH 为 2~3,施氏矿物与渗滤液中污染物存在较强的静电吸引作用,有利于污染物的去除,这与 Zhao 等[25]研究结果是一致的.

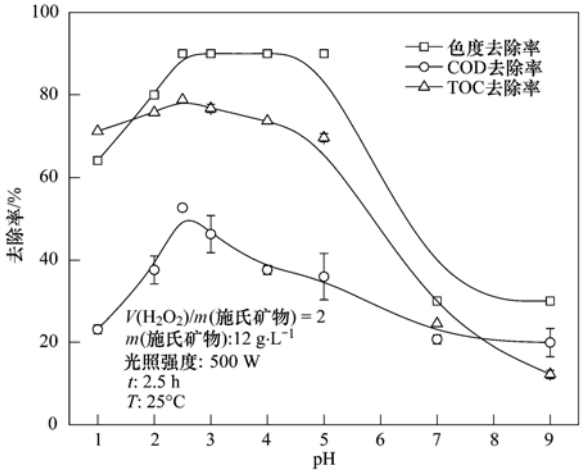

图 4 pH 对光化学法降解渗滤液污染物的影响

Fig. 4 Effect of pH on photochemical degradation of pollutants in landfill leachate

2.5 光化学法处理垃圾渗滤液效果随反应时间的变化

从理论上来看,由公式(1)~(8)可知,在异相 Fenton 反应体系中,污染物的降解是一个先吸附后降解的过程. 图 5 结果表明,渗滤液色度、TOC 和

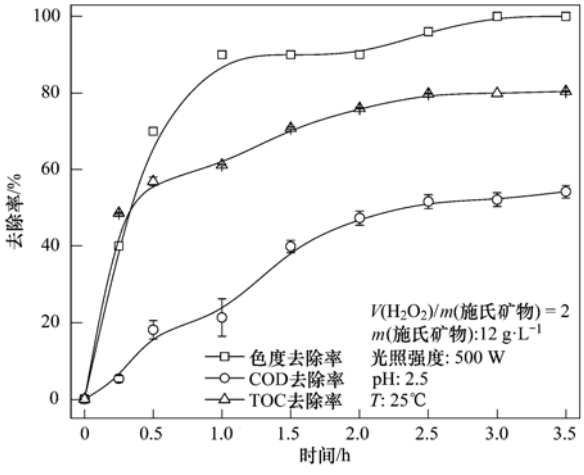

图 5 污染物去除率随时间的变化

Fig. 5 Effect of reaction time on pollutants removal efficiencies

COD 去除率随着反应时间的延长而逐渐上升，在 2.5 h 时基本达到稳定的状态，此时各指标去除率分别为 96.0%、79.8% 和 51.6%. 这可能是因为在反应初期，渗滤液中污染物被吸附在施氏矿物表面而未被氧化降解，随着时间的延长，体系中产生大量·OH，污染物参与氧化反应而降解为无机或其它小分子有机物.

2.6　反应温度对光化学法处理垃圾渗滤液的影响

有研究表明，升温可加快污染物分子运动，使其与·OH碰撞几率增加，在一定程度上推进氧化进程[29]. 从图 6 可以看出，随着温度的上升，体系中各指标变化具有明显差异. 其中，色度去除率均维持在 95% 以上，温度升高略有所降低. TOC 去除率在 15℃时就能达到 66.2% 的去除率，且随着温度的上升仍有所提高，在 40℃时达到最高值 83.7%. 然而，COD 的去除率却随温度的提高呈先上升后下降的趋势. 这可能是因为在低温下光化学反应进程较慢，氧化速率低于常温(25℃)进而导致低温时 COD 去除率相对较低. Lyman 等[30] 指出，Fenton 试剂氧化有机物质过程包含 3 个阶段，第一阶段，母体化合物结构发生改变，生物可降解性提高；第二阶段，体系毒性降低；第三阶段，有机物质被完全氧化为 CO_2 和 H_2O. 由此可知，氧化反应经过第一阶段后，不易被 $K_2Cr_2O_8$ 氧化的有机物(如吡啶、芳香族等)[31] 结构发生改变，变为结构简单的易降解物质(如直链结构等)，导致 COD 测定值升高，因此，COD 去除率呈现下降趋势. 由 TOC 的测定原理[31] 可知，TOC 反应了体系中总有机碳的含量，不受污染物结构和形态影响，因此，以 TOC 和色度作为评价指标可知，以施氏矿物/H_2O_2/UV 法处理垃圾渗滤液的温度范围较宽，常温状态即可达到较好的去除效果，以经济角度考虑，选择 25℃为最佳反应温度.

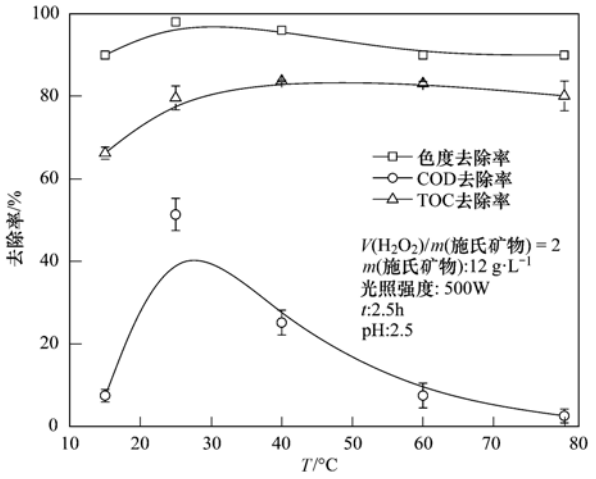

图 6　温度对光化学法降解渗滤液污染物的影响

Fig. 6　Effect of temperature on photochemical degradation of pollutants in landfill leachate

2.7　施氏矿物、H_2O_2、传统均相 Fenton 反应对垃圾渗滤液处理效果的比较

从图 7 中各指标去除率可知，不同处理下紫外光照效果均优于避光条件. 色度去除效果依次为 H_2O_2 > 异相 Fenton 反应 > 施氏矿物[图 7(a)]. 分析认为，H_2O_2 的强氧化性使得体系中部分有色的无机、有机及其它还原性物质氧化分解而表现出色度降低；而施氏矿物具有较大的比表面积[32]，对有色污染物具有一定的吸附作用；虽然在异相 Fenton 反应中产生的强氧化性·OH可直接将难降解污染物氧化为简单物质，但同时也使得部分吸附于施氏矿物表面或结合的 Fe^{3+} 被释放出来而影响色度. 而在均相 Fenton 反应中，由于 Fe^{2+} 氧化产物 Fe^{3+} 的影响，

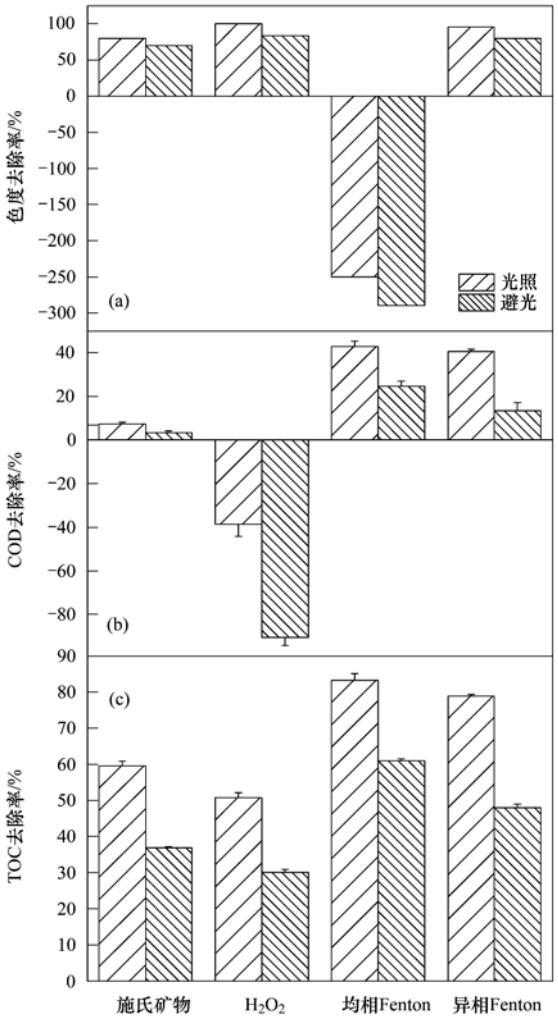

图 7　不同对照下渗滤液污染物去除效率

Fig. 7　Degradation efficiency of pollutants in landfill leachate under different conditions

部分 Fe^{3+} 水解生成 $Fe(OH)_3$ 絮状沉淀,但大部分 Fe^{3+} 仍以游离态存在,使得体系色度大幅度提高. 由图 7(b)可知,施氏矿物单独作用对 COD 的去除效果并不明显,在紫外光照下只有 7.3%; 另外,由于 H_2O_2 反应不完全,剩余 H_2O_2 反而会引起 COD 测定值偏高,避光条件下更为显著; 而在紫外光照下,均相和异相 Fenton 反应对渗滤液 COD 去除效果相当. 从 TOC 来看[图 7(c)],由于施氏矿物的吸附和 H_2O_2 氧化污染物的作用,单独施氏矿物和 H_2O_2 处理也有利于 TOC 的去除. 与异相 Fenton 反应相比,均相 Fenton 反应 TOC 去除率略高.

综上所述,均相和异相 Fenton 反应各自均有优缺点. 在紫外光照下,二者对渗滤液 COD 和 TOC 去除效果相当,且在避光下去除效果均相 Fenton > 异相 Fenton 反应. 而均相 Fenton/UV 反应产物 Fe^{3+} 会导致处理后出水色度远高于原水,且反应生成的絮状物 $Fe(OH)_3$ 难以沉降去除; 而施氏矿物本身是一种羟基硫酸盐高铁矿物,在异相 Fenton/UV 处理后沉降性较好,且产生的 Fe^{3+} 离子对渗滤液色度干扰较小. 另外,施氏矿物在 pH = 2.5 体系中并不溶解,过滤后烘干便可继续循环使用,有效降低了渗滤液有机污染物的处理费用.

3 结论

(1)在一定条件下,采用施氏矿物/H_2O_2/UV 法可有效去除垃圾渗滤液色度、TOC 和 COD,最佳反应条件为:施氏矿物添加量为 12 $g\cdot L^{-1}$,$V(H_2O_2)/m$(施氏矿物) = 2,UV = 500 W,起始 pH = 2.5,反应时间 2.5 h,反应温度 25℃,此时色度、TOC 和 COD 去除率分别为 98.0%、79.6% 和 51.3%.

(2)在紫外光照或避光条件下,除色度去除率与 H_2O_2 处理类似外,施氏矿物/H_2O_2 共存体系中渗滤液各指标去除效果均优于施氏矿物或 H_2O_2 单独作用,且紫外光照更有利于污染物去除. 传统均相 Fenton 反应对渗滤液 COD 和 TOC 去除率与施氏矿物/H_2O_2 共存体系相当,但前者处理后渗滤液色度明显增加,且产生大量难以沉降的 $Fe(OH)_3$ 絮体.

(3)采用施氏矿物/H_2O_2/UV 法处理垃圾渗滤液,在较宽 pH 范围(2.0 ~ 5.0)内均可有效去除污染物,且施氏矿物可多次循环使用,因此,该方法具有一定的工程化应用前景.

参考文献:

[1] 董军, 赵勇胜, 张伟红, 等. 渗滤液中有机物在不同氧化还原带中的降解机理与效率研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2041-2045.

[2] 沈东升, 何若, 刘宏远. 生活垃圾填埋生物处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[3] 刘婷, 陈朱蕾 唐素琴, 等. 不同填埋时间、不同季节的垃圾渗滤液生物毒性[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 541-546.

[4] Zheng Z, Zhang H, He P J, *et al*. Co-removal of phthalic acid esters with dissolved organic matter from landfill leachate by coagulation and flocculation process [J]. Chemosphere, 2009, **75**(2): 180-186.

[5] Kurniawan T A, Lo W H. Removal of refractory compounds from stabilized landfill leachate using an integrated H_2O_2 oxidation and granular activated carbon (GAC) adsorption treatment [J]. Water Resource, 2009, **43**(16): 4079-4091.

[6] Wang F Q, Smith D W, El-Din M G. Aged raw landfill leachate: Membrane fractionation, O_3 only and O_3/H_2O_2 oxidation, and molecular size distribution analysis [J]. Water Research, 2006, **40**(3): 463-474.

[7] Cossu R, Polcaro A M, Lavagnolo M C, *et al*. Electrochemical treatment of landfill leachate: Oxidation at Ti/PbO_2 and Ti/SnO_2 anodes [J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(22): 3570-3573.

[8] Glaze W H, Kang J W, Chapin D H. The chemistry of water treatment process involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation [J]. Ozone-Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association, 1987, **9**(4): 355-352.

[9] 唐琼瑶, 何晶晶, 徐苏云, 等. 新鲜渗滤液与长填埋龄渗滤液的 Fenton 处理过程特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3258-3264.

[10] Kim S, Vogelpohl A. Degradation of organic pollutants by the photo-Fenton process[J]. Chemical Engineering & Technology, 1998, **21**(2): 187-191.

[11] Pignatello J J, Oliveros E, MacKay A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2006, **36**(1): 1-84.

[12] Hermosilla D, Cortijo M, Huang C P. Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(11): 3473-3481.

[13] Xu Z H, Liang J R, Zhou L X. Photo-Fenton-like degradation of azo dye methyl orange using synthetic ammonium and hydronium jarosite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, **546**(5): 112-118.

[14] 李瑛, 吴振禹, 周立祥, 等. 施氏矿物和有机酸共存体系中孔雀石绿的多相光催化降解[J]. 南京农业大学学报, 2012, **35**(3): 127-130.

[15] Bigham J M, Carlson L, Murad E. Schwertmannite, a new iron oxyhydroxysulfate from pyhäsalmi, finland, and other localities [J]. Mineralogical Magazine, 1994, **58**: 641-648.

[16] Sehwertmann U, Bigham J M, Murad E. The first occurrence of schwertmannite in a natural stream environment[J]. European

Journal of Mineralogy, 1995, **7**(3): 547-552.

[17] APHA, AWWA, WPCF. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater [M]. (18th ed.). Washington, DC, USA: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 1992.

[18] 李浙英, 梁剑茹, 柏双友, 等. 生物成因与化学成因施氏矿物的合成、表征及其对 As(Ⅲ)的吸附[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 460-467.

[19] 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, 2006. 211-213.

[20] 周俊, 杨新萍, 周立祥. 自配消解液分光光度法测定污水中的 COD[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(11): 1956-1960.

[21] Lin S S, Gurol M D. Catalytic decomposition of hydrogen peroxide on iron oxide: Kinetics, Mechanism, and Implications [J]. Environmental Science Technology, 1998, **32**(10): 1417-1423.

[22] Zhang H, Choi H J, Huang C P. Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, **125**(1-3): 166-174.

[23] Lunar L, Sicilia D, Rubio S. Degradation of photographic developers by Fenton's reagent: condition optimization and kinetics for metol oxidation [J]. Water Resource, 2000, **34**(6): 1791-1802.

[24] Ghaly M Y, Farah J Y, Fathy A M. Enhancement of decolorization rate and COD removal from dyes containing wastewater by the addition of hydrogen peroxide under solar photocatalytic oxidation [J]. Desalination, 2007, **217**(1-3): 74-84.

[25] Zhao Y P, Hu J Y, Chen H B. Elimination of estrogen and its estrogenicity by heterogeneous photo-Fenton catalyst β-FeOOH/resin [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2010, **212**(2-3): 94-100.

[26] He J, Ma W H, He J J, *et al*. Photooxidation of azo dye in aqueous dispersions of H_2O_2/α-FeOOH [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2002, **39**: 211-220.

[27] 李浙英. 化学与生物成因施氏矿物的矿物学特征及其对水中 As(Ⅲ)的吸附去除效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.

[28] 胡晨燕, 徐斌, 李光明, 等. 生活垃圾焚烧厂渗滤液生化出水的混凝机理研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2574-2579.

[29] 杨运平, 唐金晶, 方芳, 等. UV/TiO_2/Fenton 光催化氧化垃圾渗滤液的研究[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(7): 34-37, 41.

[30] Lyman W J, Reehl W F, Rosenblatt D H. Handbook of chemical property estimation methods[A]. In: Environmental Behavior of Organic Compounds[M]. New York: McGraw-Hill, 1982.

[31] 奚旦立, 孙欲生, 刘秀英. 环境监测 [M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2004.

[32] 周顺桂, 周立祥, 陈福星. 施氏矿物 Schwertmannite 的微生物法合成、鉴定及其对重金属的吸附性能[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27**(2): 367-370.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 4

Apr. 15, 2014

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012 ····· WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1230)

Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM_{10} from One Coking Plant ····· DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1256)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China ····· ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, *et al.* (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, *et al.* (1271)

Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input ····· FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, *et al.* (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, *et al.* (1290)

Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing ····· LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, *et al.* (1297)

Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of *Vallisneria natans* ····· LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, *et al.* (1304)

Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland ····· PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, *et al.* (1311)

Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions ····· DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, *et al.* (1318)

Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water ····· HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, *et al.* (1326)

Photoreactivation of *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO_2 ····· WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, *et al.* (1332)

Stability of C_{60} Nanoparticles in Aquatic Systems ····· FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, *et al.* (1337)

Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions: XDLVO Approach ····· ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, *et al.* (1343)

Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H_2O_2) ····· FU Rong-bing (1351)

Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene ····· WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, *et al.* (1358)

Research on Removal Efficiency of Cd(Ⅱ)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter ····· WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, *et al.* (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, *et al.* (1372)

Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of *Acidithiobacillus ferrooxidans* ····· CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)

Microbial Reduction of Cu^{2+} Mediated by Electroactive Biofilms ····· LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, *et al.* (1384)

Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards ····· CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, *et al.* (1391)

Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons ····· HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, *et al.* (1399)

Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H_2O_2 ····· WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, *et al.* (1407)

Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater ····· YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, *et al.* (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 *Aminobacter* sp. H1 and Its Oxidation Mechanism ····· YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, *et al.* (1428)

Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(Ⅱ)-Oxidizing Bacteria ····· WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, *et al.* (1437)

Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain *Pseudomonas* sp. I-24 via Co-Metabolism ····· XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, *et al.* (1443)

Using Flow Cytometry to Explore the Changes of *Sphingomonas* sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ····· ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, *et al.* (1449)

Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and *Chlorella vulgaris* ····· CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, *et al.* (1457)

Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of *Chlorella vulgaris* ····· WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, *et al.* (1462)

Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots ····· WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, *et al.* (1468)

Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O_3 Concentrations in Northeast China ····· ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, *et al.* (1473)

Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses ····· WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, *et al.* (1479)

Effects of Lead on the Growth and Reproduction of *Eisenia fetida* with Aged Soils ····· CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, *et al.* (1486)

Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research ····· ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, *et al.* (1491)

Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet ····· BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, *et al.* (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, *et al.* (1502)

Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park ····· LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, *et al.* (1509)

Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area ····· ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, *et al.* (1516)

Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator ····· XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, *et al.* (1523)

Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai ····· ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, *et al.* (1531)

Impact of SDBS/Na^+ on Red Soil Colloidal Stability ····· TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, *et al.* (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, *et al.* (1548)

Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd^{2+} by Algal in Water ····· DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, *et al.* (1555)

Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene ····· LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1586)

Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment ····· ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, *et al.* (1597)

Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium ····· LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, *et al.* (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） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection 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 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 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 （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