

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验

陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张良林, 肖军

(云南大学化学科学与工程学院, 昆明 650091)

摘要: 阳宗海是我国云南省第三大高原湖泊, 2008年6月发现被砷污染, 水质从Ⅱ类下降到劣Ⅴ类。由于阳宗海面积有31 km², 蓄水量6.04亿 m³, 不可能实施传统除砷絮凝法中的预氧化及调pH值等操作, 试验研究了直接对阳宗海砷污染湖水雾化喷洒FeCl₃溶液除砷的工艺条件。结果表明, 对于pH 8.6的50 L湖水, FeCl₃用量为1.62~3.20 mg·L⁻¹即可达到95.1%~96.7%的除砷率。在除砷反应中, 湖水的pH值稳定不变, 湖中鱼类的生存不受影响, 且反应生成的沉淀物在954 d后于湖水中仍稳定存在, 检测不出砷。在现场1万 m³和25万 m³湖水中的扩大试验也取得了良好的除砷效果, 为大型湖泊水体减污治理提供了典型实施范例。

关键词: 砷污染; 絮凝法; 三氯化铁; 湖泊; 阳宗海

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0202-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.026

Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake

CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, HUANG Zhang-jie, WANG Shi-xiong, WANG Chong, WEI Qun-yan, ZHANG Gen-lin, XIAO Jun

(School of Chemistry Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Yangzonghai Lake is the third largest plateau lake in Yunnan province. In June 2008, arsenic contamination was detected in Yangzonghai Lake and the water quality worsens dramatically from standard grade Ⅱ to worse than grade V. Since Yangzonghai Lake is so large with the area of 31 km² and the storage capacity of 6.04 × 10⁸ m³, those pretreatment operations of the traditional arsenic removal methods, such as pre oxidation, adjusting pH value, are not applicable. In this study, a facile remediation strategy for arsenic removal by coagulation process, in which ferric chloride was directly sprayed into the contaminated water without any pretreatment, was reported. The results showed that the arsenic removal percentage was up to 95.1%~96.7% for 50 L raw water with reagent dosage of 1.62~3.20 mg·L⁻¹. Furthermore, the pH value of the lake kept constant in the coagulation process, which was beneficial for fish survival. Re-dissolved arsenic from precipitation was not detected in 954 days. The strategy of ferric chloride coagulation were applied to field experiments for lake water with volumes of 1 × 10⁴ m³ and 25 × 10⁴ m³, in which arsenic was also removed effectively. The reported strategy was of great advantage for simple operation, low cost and ecological safety, therefore it provides a representative example for arsenic contamination treatment of large lake.

Key words: arsenic contamination; flocculation precipitation; ferric chloride; lake; Yangzonghai Lake

阳宗海位于东经102.5°~103.02°, 北纬24.51°~24.58°之内, 距昆明36 km。湖体面积31 km², 平均水深20 m, 蓄水量6.04亿 m³, 是云南省第三大高原湖泊。阳宗海为小江断裂带西支断裂面形成的断陷湖盆, 湖水主要靠雨水汇集。2008年6月, 环境监测人员发现湖水砷浓度异常上升, 水质从一直保持的Ⅱ类下降为劣Ⅴ类^[1, 2]。经调查, 砷污染源来自湖面西南角山丘上的一个化工厂, 该地区属喀斯特地貌, 化工厂区地下为碳酸盐岩体及溶洞, 岩溶强烈发育。化工厂违规排放的高砷废水经土壤进入岩溶区, 再从岩溶区裂隙形成的泉眼入湖^[3]。由于湖水体积庞大, 砷浓度又相对较低(最高值为0.134 mg·L⁻¹), 因此治理阳宗海湖泊水体中的砷污染物十分困难。

从污染的水体或工业废水中除砷的方法很多, 美国环境保护署(USEPA)推荐了7种方法。这7种方法中絮凝法和吸附法最受关注^[4], 絮凝法在20世纪60年代后有许多研究^[5~8], 氯化铁絮凝法除砷的各种影响因素和反应机制也有一定深度的认识^[9~11]。用电解产生铁离子的电絮凝法曾一度成为热点研究课题^[12~14]。此外, 还有改进过滤方式的絮凝/微滤法^[15], 加方解石细粉加速沉降速度的絮凝法^[16]以及加活性淤泥用微生物促进As(Ⅲ)和As(Ⅴ)氧化还原的絮凝法^[17]等。氯化铁絮凝法在

收稿日期: 2014-05-16; 修订日期: 2014-08-05

基金项目: 云南省重大社会发展科技计划-社会事业发展专项(2009CA047); 云南省高端技术人才项目(2013HA010, 2014HA010)

作者简介: 陈景(1935~), 男, 教授, 主要研究方向为高原湖泊水体污染治理, E-mail: chjing@ynu.edu.cn

前述研究中存在一些共同的问题：① As(Ⅴ)比As(Ⅲ)更易被无定形氢氧化铁吸附,因此需要对砷污染的水预氧化使As(Ⅲ)转化为As(Ⅴ),通常用氯气作氧化剂。USEPA的一些示范工程用次氯酸钠溶液作氧化剂^[18]；② 铁盐水解反应会释放氢离子,降低水体的pH值,并影响无定形Fe(OH)₃胶团双电层的电荷性质,对除As(Ⅴ)和As(Ⅲ)有不同的要求,需要进行pH调节和控制；③ 絮凝剂用量和Fe/As比与砷浓度有关,对As(Ⅴ)和As(Ⅲ)也有不同的要求；④ SO₄²⁻和PO₄³⁻有强烈竞争作用,能抑制吸附砷；⑤ Ca²⁺离子吸附在胶团表面后,能提高除砷效果。绝大多数以小型试验研究这些问题,优化除砷反应条件。

然而,对于大型湖泊水体污染治理,不可能进行水体预氧化和pH值调节,在工程化运作时甚至连试剂用量和搅拌强度也不可能控制。因此,本文改变了一般实验室研究中对砷合成试样进行条件优化试验的工作方法,直接用被污染的湖水,不进行砷的预氧化,也不进行调节水体pH,用最简单的雾化喷洒操作,考察了FeCl₃除砷的效果。在现场扩大试验中只追求了解投放絮凝剂时水体砷浓度和pH值变化的速度和趋势。本研究表明,这样的思路和方法获得了许多超出预期的结果,为阳宗海水体降砷治理工程提供了技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料

从阳宗海中取被砷污染的湖水作试验用水。絮凝剂用化学纯试剂FeCl₃·6H₂O,称取270.5 g用蒸馏水溶解于1 000 mL容量瓶中作储备液,FeCl₃浓度为1.0 mol·L⁻¹,相当于162.5 mg·mL⁻¹。无水AlCl₃为化学纯试剂,配制浓度为1.0 mol·L⁻¹的溶液100 mL作储备液,供比较试验使用。

1.2 分析

水样中的As浓度在云南出入境检验检疫局分析测试中心用原子荧光光谱(北京吉天,ASF-930)分析。Fe浓度采用原子吸收光谱分析(日立,Z2000)。pH值用METTLER-TOLEDO FE20酸度计测定。

1.3 湖水中主要组分

2009年1月从阳宗海南部取水样分析主要无机离子的浓度结果列于表1。

1.4 试验方法

取阳宗海砷污染湖水分装于容积为50 L的塑料桶中待用,每份试验均取一桶湖水进行。每次均

将预定量的储备液取于玻璃小烧杯中,用蒸馏水稀释10倍后,转入一个微型喷雾瓶中,直接喷洒到湖水水面,不搅拌或轻微人工搅动1 min,任其澄清。在预定时间用移液管从上清液取样,用滤纸过滤入容量瓶中分析砷浓度。累计时间指两次取样的总计时间。除另有说明外,试验所用湖水的砷浓度均为0.110 mg·L⁻¹。

表1 阳宗海湖水的主要组分¹⁾

Table 1 Main components of the Yangzonghai Lake			
组分离子	浓度/mg·L ⁻¹	组分离子	浓度/mg·L ⁻¹
总 As	0.128	PO ₄ ³⁻	0.045
SO ₄ ²⁻	64	NO ₃ ⁻	0.051
HCO ₃ ⁻	0.170	Cl ⁻	0.049
CO ₃ ²⁻	<0.100	Ca ²⁺	20
pH	8.65		

1)总As中,As(Ⅲ)和As(Ⅴ)所占质量分数分别为21.7%和78.3%；Ca²⁺、SO₄²⁻、CO₃²⁻和Cl⁻通过比浊法测定,其它阴离子用比色法测定

1.5 2.7 m³ 湖水的放大试验

用洒水车从阳宗海湖岸边取水2.7 m³,注入一水泥储槽中。由于此次取水点在岸边浅滩,受当日雨水稀释,砷浓度为0.046 mg·L⁻¹。试验前先在储槽中投放锦鲤鱼十余条,在人工轻微搅动下,将27 mL FeCl₃储备液稀释10倍后向水面喷洒,24 h后取双样分析。其后用同样方式再喷洒同量的储备液,轻微搅动1 min,累计时间为48 h时再取双样。第2次取样后,不再喷洒储备液,仅搅动10 min,澄清至72 h第3次取样。

1.6 10 000 m³ 水体中的现场扩大试验

2009年8月,在阳宗海南部岸边水面,用泡塑作浮标圈出一片50 m×50 m的正方形水域,每边及对角线上各测定5个点的深度。测定计算平均深度为4 m,水容量约10 000 m³。由于采用多种方法均不能达到使试验水体从湖体中隔离分开,于是决定沿试验水体四边喷洒,从对角线中点取样,定性考察水体砷浓度及pH的变化情况。具体操作采用3台汽油发电机在岸上提供动力,用离心泵将FeCl₃溶液通过长塑料管输送到6条小型铁皮舟上,用喷洒设备沿试验区边线喷洒120 min。在试验区中心处用潜水泵按不同时间、不同垂直深度取样,送云南出入境检验检疫局分析测试中心分析。

1.7 250 000 m³ 水体中的现场扩大试验

在阳宗海东北角水面上,用浮标圈出一块150 m×130 m的水域,测量周边30多个点的深度,平均水深12 m,湖水容量约为25万m³。试验取样点定在该

区域的中心. 用8条小船进行机械喷洒 FeCl_3 稀溶液和用两艘燃油动力的大船驶入离岸较远的水面喷洒. 此次试验直接采用湖水配制 FeCl_3 溶液. 由于当天风浪较大, 喷洒作业只进行了 110 min. 当日下午, 又在靠岸区域用离心泵进行了第2次喷洒. 第2次喷洒试验完全由宜良县环监站人员负责取样和分析.

表2 氯化铁用量及搅拌方式的影响

Table 2 Effects of ferric chloride dosage and mixing method on arsenic removal

编号	储备液 /mL	FeCl_3 用量 /mg·L ⁻¹	Fe/As 摩尔比	累计时间 /h	残余砷浓度 /mg·L ⁻¹	除砷率 /%
A	2.0	6.48	27.4	5	0.034	72.1
B	0.5	1.62	6.9	8	0.006	95.1
C	1.0	3.24	13.7	8	0.004	96.7
D	2.0	6.48	27.4	5	0.004	96.7

从表2中数据看出, A号已可使除砷率达到72.1%. B号试验将储备液用量降至0.5 mL, 虽然仅缓慢搅动1 min, 但除砷率已可提高到95.1%. C号增加储备液用量至1.0 mL, 除砷率提高至96.7%. D号继续增加 FeCl_3 用量已不能提高除砷效果.

按照C号 FeCl_3 用量为3.24 mg·L⁻¹计算, 已相当于1 t FeCl_3 可以使约31万 m³ 湖水中的砷从0.110 mg·L⁻¹降低到0.004 mg·L⁻¹.

上述试验结果还表明了对阳宗海含砷湖水使用絮凝法除砷时, 可以不进行预氧化, 而大量报道中均要求用各种氧化剂, 如氧气和臭氧^[19]、光催化^[20]、氯化氧化物^[21]、高锰酸钾^[22]和过氧化氢^[23]等将

2 结果与讨论

2.1 氯化铁用量及搅拌方式对除砷率的影响

A号试验喷洒 FeCl_3 时不搅动桶中50 L湖水, B、C、D号试验则在喷洒时用塑料棒人工缓慢搅动1 min, 试验结果列于表2.

As(Ⅲ)氧化到As(Ⅴ).

2.2 氯化铁溶液浓度对除砷效果的影响

表3给出了固定储备液用量0.5 mL, 稀释不同倍数后, 氯化铁浓度对除砷率的影响. 从中看出, 在 FeCl_3 用量相同时, 其浓度对除砷效果无明显影响. 原因可解释为 FeCl_3 水解反应所需的 pH 2.5 是一常数, 对于0.5 mL的储备液, 水解开始出现 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体状态所需的水量相同. FeCl_3 浓度高, 则扩散空间较大, 水解所需的时间稍长. 反之, FeCl_3 浓度低则水解时间缩短, 但拥有的胶体体积量相似. 表3数据符合除砷机制不是 Fe^{3+} 离子沉淀砷, 而是 FeCl_3 水解为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体粒子时吸附砷.

表3 氯化铁溶液浓度的影响¹⁾

Table 3 Effects of ferric chloride concentration

FeCl_3 量 /mg·L ⁻¹	稀释倍数	喷洒液 pH	FeCl_3 浓度/%	残余砷浓度 /mg·L ⁻¹	除砷率/%
1.62	10	1.69	1.62	0.016	85.5
1.62	20	1.91	0.82	0.017	84.6
1.62	50	2.16	0.33	0.015	86.7
1.62	100	2.37	0.16	0.015	86.7

1) 放置时间均为12 h

2.3 喷洒 FeCl_3 溶液时对水中鱼类的影响考察

在50 L的湖水中, 放入了5条锦鲤鱼, 然后将3份储备液均先稀释至10 mL, 在轻微搅动下,

3 min内加完第一份, 停止搅动, 按预定时间取样后, 采用相同方式依次加入其它两份, 结果列入表4.

表4 锦鲤鱼存在下的除砷效果

Table 4 Effects of the presence of koi fish on arsenic removal

储备液累计量 /mL	FeCl_3 量 /mg·L ⁻¹	累计时间 /h	残余砷浓度 /mg·L ⁻¹	除砷率/%
0.1	0.32	24	0.045	59.1
0.2	0.64	48	0.043	60.9
0.3	0.96	72	0.034	69.1

由于 FeCl_3 的用量更低,导致除砷率低于 70%。但此试验观察到除砷过程并未影响锦鲤鱼的生存,在 3 次喷洒及 72 h 放置时间内,锦鲤鱼灵活地游动在塑料桶中,表明按本研究操作条件除砷不影响锦鲤鱼的生存。

2.4 絮凝沉淀物在水中稳定性的考察

2011 年 12 月从阳宗海中部取湖水 50 L 于塑料桶中,测定砷浓度为 $0.075 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,加入 FeCl_3 溶液后,人工搅拌 1 h,澄清取样,旋紧塑料桶盖,放置陈化,继后按一定时间从上清液取样。每次取样前一

天先用人工搅拌 1 h,所得结果列于表 5。

表 5 数据再次表明,As(Ⅲ)和 As(Ⅴ)都可完全被沉出,絮凝物沉淀在水中相当稳定,在 120 d 后已检测不出砷,954 d 仍未检测出砷。在 613 d 时检测 Fe 浓度为 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远低于中国国标允许的 $0.250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。pH 值在陈放过程中也基本保持不变。

2.5 铁、铝盐复合吸附除砷效果考察

用明矾 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ 作絮凝剂除砷在文献[24]中已有报道。因此本研究用加入 AlCl_3 储备液进行了铁、铝盐混合使用效果的试验,结果列于表 6。

表 5 絮凝沉淀物在水中稳定性的考察¹⁾

Table 5 Stability of coagulation sediment in water

项目	累计时间/d										
	0	10	40	85	120	240	365	478	613	834	954
砷浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.075	0.002	0.002	0.001	0.001	nd	nd	nd	nd	nd	nd
pH	8.65	8.64	—	—	8.63	—	—	8.62	8.61	8.63	8.62

1) FeCl_3 用量为 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Fe/As 摩尔比 18.54; nd 为检测无砷 ($<0.001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

表 6 铁、铝盐混合除砷的效果考察

Table 6 Effects of iron or aluminum salts on arsenic removal

Fe 储备液 /mL	Al 储备液 /mL	陈放时间 /h	残余砷浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	除砷率 /%
0.4	0.1	12	0.017	84.6
0.3	0.2	12	0.021	80.9
0.2	0.3	12	0.025	77.3
0.1	0.4	12	0.033	70.0
0	0.5	12	0.060	45.5

表 6 数据表明, AlCl_3 吸附除砷的效果远不如 FeCl_3 ,随着铁盐用量的降低,除砷率不断下降,单独使用 AlCl_3 时,除砷率降低到 45.5%。此外,从试验现象看出,铝盐絮状沉淀的形成速度和沉降速度明显低于铁盐。

2.6 除砷效果与文献中数据的比较

Andrianisa 等^[17]曾归纳了一些文献中 FeCl_3 絮凝法除砷条件及效果,与本研究结果的比较列入表 7。从数据看出,本研究的水体 pH 值高于文献中的数值, FeCl_3 用量则低于大多数文献数据,除砷效果相当满意。

表 7 除砷效果的比较^[17]

Table 7 Comparison of arsenic removal effects

水源	pH	砷初始浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	残余砷浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	除砷率 /%	FeCl_3 量 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Fe/As 摩尔比 ⁵⁾
典型淡水	7.0	$0.100^{1)}$	<0.002	~100	4.9	22.8
	6.7	$1.000^{1)}$	0.110	89	10	5.4
自来水	6.7	$0.100^{1)}$	$0.005^{2)}$	95	9	4.0
	7.3	$0.040^{3)}$	0.003	92.5	16.1	200.9
地下水	7.3	$0.090^{4)}$	0.017	81.1	35	221.0
	8.0	$0.090^{4)}$	0.003	96.6	46	243.8
	5.0	30	0.050	99.8	948.9	14.7
	5.0	30	0.020	~100	1 822.6	28.1
城市废水	7.0	0.163	0.100	38.7	2	14.7
	7.0	0.163	0.010	93.9	6	17.4
阳宗海湖水	8.6	0.110	0.004	96.7	3.2	13.4
	8.6	0.075	<0.001	~100	3.0	18.5

1) 将 $\text{NaHAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 试剂加入到典型的淡水或自来水中,模拟含砷水质; 2) 该试验还加入阳离子聚合物以促进 FeCl_3 的处理效果; 3) 水样取自 Albuquerque, NM, USA; 4) 水样取自 Naval Air station, Fallon, NV, USA; (5) 文献[17]中 Fe/As 比为质量比

3 阳宗海湖水除砷的扩大试验结果

试验用的水槽为长方形,试验湖水量为 2.7 m^3 ,由于加以锦鲤鱼的存在,使人工轻微搅动受限,24 h 的除砷效果较低,但增加 FeCl_3 用量及延长取样时间后效果已明显提高,数据列入表 8.

此外,本试验还观察到水体变得更清澈,水中的锦鲤鱼未受除砷过程影响,10 d 后仍然游动自如.

3.1 $10\,000 \text{ m}^3$ 水体除砷阳宗海现场扩试结果

扩试结果列入表 9、表 10. 从表 9 数据看出,喷洒 FeCl_3 溶液前,不同深度的砷浓度在 $0.138 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,底部稍低. 喷洒 30 min 后,表层和 0.5 m 深度降低到 $0.014 \sim 0.010 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 1~3 m 深度

的砷浓度均大幅度降低,表明 FeCl_3 产生的絮状沉淀降砷速度很快,并在沉降过程中继续吸附砷. 120 min 停止喷洒后,表层在 140 min 时出现了砷浓度最低值 $0.004 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 260 min 时表层至 2 m 深度仍保持在 $0.050 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

表 10 数据表明,喷洒前不同深度湖水的 pH 值为 9 左右,喷洒过程中略微降低,除最低值 8.36 外,其余数据均 >8.59 ,且在 260 min 时,平均值完全恢复到未进行喷洒前. FeCl_3 溶液喷洒过程中湖水 pH 值基本不变,对水体中动植物生态安全极为有利. 试验 6 d 后,4 名技术人员认真巡视了试验水域内外,并与非试验区的多种水草进行对比,结果表明试验区内各种水草植物生长状态良好,水体中无异常现象.

表 8 2.7 m^3 湖水的除砷效果¹⁾

Table 8 Arsenic removal effects by coagulation process for 2.7 m^3 lake water

储备液累计量/mL	Fe/As 摩尔比	累计时间/h	残余砷浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	除砷率/%
27	11.9	24	0.023 0.025	47.8
54	23.8	48	0.013 0.012	72.8
54	23.8	72	0.006	87.0

1) 湖水量 $2\,700 \text{ L}$,初始砷浓度 $0.046 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

表 9 不同湖水深度砷浓度随时间的变化/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 9 Changes of arsenic concentration with time in different depths of water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

深度	喷洒前	时间/min					
		30	90	120	140	200	260
表层	0.138	0.014	0.017	0.036	0.004	0.024	0.052
0.5 m	0.138	0.010	0.025	0.027	0.023	0.024	0.050
1 m	0.140	0.034	0.047	0.024	0.043	0.030	0.051
2 m	0.131	0.054	0.050	0.033	0.055	0.049	0.052
3 m	0.120	0.049	0.044	0.039	0.044	0.019	0.038

表 10 不同深度湖水 pH 随时间的变化

Table 10 Changes of pH value with the time in different depths of water

深度	喷洒前	时间/min					
		30	90	120	140	200	260
表层	9.03	8.66	8.71	8.88	8.36	8.67	8.91
0.5 m	8.98	8.59	8.83	8.88	8.78	8.62	9.04
1 m	9.00	8.88	8.92	8.87	8.87	8.73	9.05
2 m	8.98	8.96	9.01	8.91	8.89	8.94	9.01
3 m	8.75	8.84	8.88	8.89	8.90	8.62	8.92

3.2 $250\,000 \text{ m}^3$ 水体除砷现场扩试结果

3.2.1 扩试过程中水体砷浓度随时间的变化结果

从表 11 及图 1、图 2 看出,喷洒 FeCl_3 溶液前,试验区水体不同深度的砷浓度为 $0.122 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,3 m 深处稍低. 喷洒 30 min 后,砷浓度均大幅度降低,

其中表层和 0.5 m 深处砷浓度分别降低至 $0.004 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.003 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除砷率平均为 97.1%. 2 m 和 3 m 深处砷浓度分别降低至 $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.028 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除砷率平均为 78.3%. 这些数据表明铁盐絮凝法除砷时,吸附砷的反应垂直向下延伸

的速度很快。

表 11 25 万 m³ 水体取样点砷浓度数据/mg·L⁻¹
Table 11 Arsenic concentration sampled from different depths in 250 000 m³ water/mg·L⁻¹

深度	喷洒前	时间/min			
		30	60	90	110
表面	0.122	0.004	0.034	0.046	0.048
0.5 m	0.122	0.003	0.003	0.056	0.042
1 m	0.121	0.038	0.005	0.055	0.052
2 m	0.122	0.025	0.004	0.049	0.052
3 m	0.118	0.028	0.018	0.054	0.057

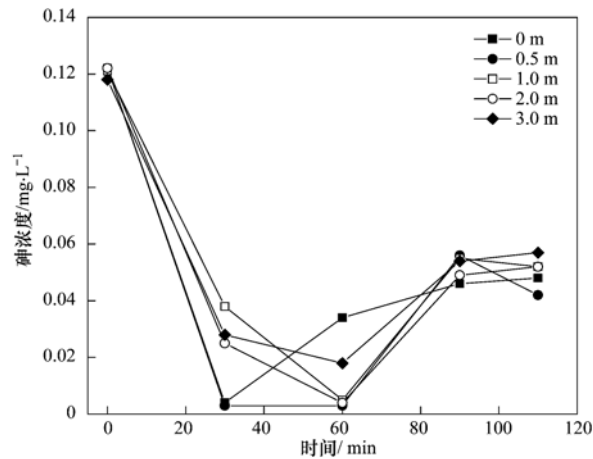


图 1 取样时间与砷浓度之间的关系

Fig. 1 Relationship between different depths of arsenic concentration and sampling time

由于试验区域广,当天风浪很大,波浪引起 FeCl₃ 入水产生的红色沉淀物像一条条飘带,迅速从

试验区流走. 试验区外的水则大量涌进区内. 因此,喷洒至 90 min 和 110 min 所取的全部样品,砷浓度基本波动在 0.050 mg·L⁻¹ 左右,比 60 min 前有回升.

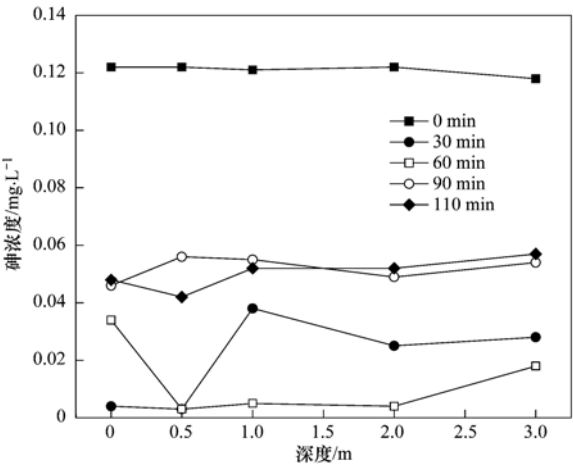


图 2 砷浓度随取样深度变化关系

Fig. 2 Relationship between arsenic concentration of different time and sampling depths

3.2.2 靠岸水域第二次喷洒 FeCl₃ 溶液的试验结果

在前述第一次喷洒 FeCl₃ 溶液后 3 h,又在试验区靠岸的浅水水域,向湖面推进约 20 m,相当于 150 m×40 m 的 6 000 m² 区域内,第二次喷洒 FeCl₃ 溶液约 800 L,由宜良县环监站工作人员按不同时间和深度取样分析,结果列入表 12 中.

表 12 湖边浅水区第二次喷洒 FeCl₃ 后的砷浓度值/mg·L⁻¹

Table 12 Arsenic concentration of the second spraying FeCl₃ solution at shallow water region/mg·L⁻¹

深度	喷洒前	时间/min				
		10	20	35	60	80
表面	0.122	0.005	0.004	0.004	0.003	0.007
0.5 m	0.122	0.002	0.002	0.002	0.003	0.007
1 m	0.122	0.001	0.002	0.009	0.004	0.010

从表 12 数据看出:第二次喷洒 10 min 后,砷浓度最低已可降至 0.001 mg·L⁻¹,除砷率接近 100%. 至 60 min 停止喷洒后,由于试验区无围隔,砷浓度慢慢回升至 0.007 mg·L⁻¹,除砷率仍 >94%. 第二次喷洒结果充分证实本方法能够将 As(Ⅲ)、As(Ⅴ)同时完全沉淀.

4 结论

(1)对于阳宗海的砷污染湖水,不需将 As(Ⅲ)预氧化为 As(Ⅴ),不需调节 pH 值,直接向水体雾化喷洒 FeCl₃ 溶液即可高效除砷. 当 FeCl₃ 用量为

3.20 mg·L⁻¹ 时,可使湖水中砷浓度从 0.110 mg·L⁻¹,降低到 0.004 mg·L⁻¹,除砷率达到 96.7%.

(2)在雾化喷洒 FeCl₃ 除砷反应过程中,由于阳宗海水中 HCO₃⁻ 浓度高,湖水 pH 值可保持不变,因而不影响水体生物的生态条件.

(3)含砷絮凝物沉淀在湖水中能长期稳定不变,陈化放置至 954 d 时砷浓度仍 <0.001 mg·L⁻¹. 铁浓度在 613 d 测定时为 0.005 mg·L⁻¹,远低于国标允许值 0.250 mg·L⁻¹.

(4)1 万 m³ 及 25 万 m³ 水域的现场扩大试验结果表明:FeCl₃ 水解产生的絮状沉淀物沉降速度快,

取样点砷浓度下降迅速,pH 值基本保持不变。

(5)直接雾化喷洒 FeCl_3 溶液除砷具有除砷率高、操作简便、成本低廉、生态安全诸多优点,本研究为工程化治理阳宗海砷污染提供了技术依据。

参考文献:

- [1] 王振华,何滨,潘学军,等. 云南阳宗海砷污染水平、变化趋势及风险评估[J]. 中国科学:化学,2011, **41**(3): 556-564.
- [2] 张玉玺,孙继朝,向小平,等. 云南阳宗海湖底沉积物重金属分布与来源[J]. 环境科学与技术,2010, **33**(12): 171-175.
- [3] 张玉玺,向小平,张英,等. 云南阳宗海砷的分布与来源[J]. 环境科学,2012, **33**(11): 3768-3777.
- [4] Katsoyiannis I A, Zouboulis A I. Removal of arsenic from contaminated water sources by sorption onto iron-oxide-coated polymeric materials [J]. Water Research, 2002, **36**(20): 5141-5155.
- [5] Lakshmanan D, Clifford D A, Samanta G. Comparative study of arsenic removal by iron using electrocoagulation and chemical coagulation [J]. Water Research, 2010, **44**(19): 5641-5652.
- [6] Pallier V, Feuillade-Cathalifaud G, Serpaud B, *et al.* Effect of organic matter on arsenic removal during coagulation/flocculation treatment [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, **342**(1): 26-32.
- [7] Bilici Baskan M, Pala A. A statistical experiment design approach for arsenic removal by coagulation process using aluminum sulfate [J]. Desalination, 2010, **254**(1-3): 42-48.
- [8] Wickramasinghe S R, Han B, Zimbron J, *et al.* Arsenic removal by coagulation and filtration: comparison of groundwaters from the United States and Bangladesh [J]. Desalination, 2004, **169**(3): 231-244.
- [9] Bordoloi S, Nath S K, Gogoi S, *et al.* Arsenic and iron removal from groundwater by oxidation-coagulation at optimized pH: Laboratory and field studies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **260**: 618-626.
- [10] Hering J G, Chen P Y, Wilkie J A, *et al.* Arsenic removal by ferric chloride [J]. Journal American Water Works Association, 1996, **88**(4): 155-167.
- [11] Hering J G, Chen P Y, Wilkie J A, *et al.* Arsenic removal from drinking water during coagulation [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(8): 800-807.
- [12] Mólgora C C, Domínguez A M, Avila E M, *et al.* Removal of arsenic from drinking water: A comparative study between electrocoagulation-microfiltration and chemical coagulation-microfiltration processes [J]. Separation and Purification Technology, 2013, **118**: 645-651.
- [13] Lakshmanan R, Rajarao G K. Effective water content reduction in sewage wastewater sludge using magnetic nanoparticles [J]. Bioresource Technology, 2014, **153**: 333-339.
- [14] Wan W, Pepping T J, Banerji T, *et al.* Effects of water chemistry on arsenic removal from drinking water by electrocoagulation [J]. Water Research, 2011, **45**(1): 384-392.
- [15] Pal P, Chakraborty S, Linnanen L. A nanofiltration-coagulation integrated system for separation and stabilization of arsenic from groundwater[J]. Science of the Total Environment, 2014, **476**: 601-610.
- [16] Song S, Lopez-Valdivieso A, Hernandez-Campos D J, *et al.* Arsenic removal from high-arsenic water by enhanced coagulation with ferric ions and coarse calcite [J]. Water Research, 2006, **40**(2): 364-372.
- [17] Andrianisa H A, Ito A, Sasaki A, *et al.* Biotransformation of arsenic species by activated sludge and removal of bio-oxidised arsenate from wastewater by coagulation with ferric chloride [J]. Water Research, 2008, **42**(19): 4809-4817.
- [18] Meng X G, Korfiatis G P, Christodoulatos C, *et al.* Treatment of arsenic in Bangladesh well water using a household co-precipitation and filtration system [J]. Water Research, 2001, **35**(12): 2805-2810.
- [19] Khuntia S, Majumder S K, Ghosh P. Oxidation of As(III) to As(V) using ozone microbubbles [J]. Chemosphere, 2014, **97**: 120-124.
- [20] Wang Y J, Xu J, Zhao Y, *et al.* Photooxidation of arsenite by natural goethite in suspended solution [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(1): 31-38.
- [21] Ghurye G, Clifford D. As(III) oxidation using chemical and solid-phase oxidants [J]. Journal American Water Works Association, 2004, **96**(1): 84-96.
- [22] Li N, Fan M H, Van Leeuwen J, *et al.* Oxidation of As(III) by potassium permanganate [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(7): 783-786.
- [23] Sorlini S, Gialdini F, Stefan M. UV/ H_2O_2 oxidation of arsenic and terbutylazine in drinking water [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(2): 1311-1316.
- [24] Gregor J. Arsenic removal during conventional aluminium-based drinking-water treatment [J]. Water Research, 2001, **35**(7): 1659-1664.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i>	(11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i>	(18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i>	(25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i>	(34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong	(40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng	(49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenruiang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling	(64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i>	(72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i>	(80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i>	(87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang	(107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i>	(114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i>	(121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i>	(151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i>	(163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i>	(172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i>	(179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i>	(186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i>	(194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i>	(202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i>	(209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i>	(215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i>	(221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui	(227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i>	(237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i>	(244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i>	(252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i>	(259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i>	(266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i>	(274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i>	(280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i>	(295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i>	(301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i>	(309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i>	(314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i>	(325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i>	(333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i>	(343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i>	(349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i>	(357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu	(365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行