

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究

陈桂霞^{1,2}, 胡承志^{1*}, 朱灵峰², 童华卿¹

(1. 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; 2. 华北水利水电学院环境与市政工程学院, 郑州 450011)

摘要: 铝盐混凝法被广泛应用于饮用水除砷工程. 本研究选取三氯化铝 ($AlCl_3$) 和富含 Al_{13} 的聚合氯化铝 (PACl) 为絮凝剂, 考察铝形态、pH 值、腐殖酸 (HA) 以及共存阴离子对砷去除的影响与机制. 结果表明, 2 种絮凝剂对 As(III) 去除效能较低, 对 As(V) 去除率可达到近 100%. pH 影响混凝过程中铝形态分布, 从而对铝盐混凝除砷效能产生重要影响. 铝盐除砷效能与混凝过程中的 Al_{13} 形态含量呈正相关关系. 由于竞争吸附作用, HA 和部分共存阴离子对砷的混凝去除产生负面影响. HA 对混凝效能影响与絮凝剂投药量相关, 投药量越低, 则影响越大. PO_4^{3-} 和 F^- 对混凝除砷效能影响显著, SiO_3^{2-} 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 对混凝除砷效能影响较小. 本研究将对饮用水强化混凝去除原水中砷具有指导意义.

关键词: 砷; 混凝; 铝盐; Al_{13} 形态; 饮用水

中图分类号: X703.5; TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1386-06

Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process

CHEN Gui-xia^{1,2}, HU Cheng-zhi¹, ZHU Ling-feng², TONG Hua-qing¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Institute of Environmental & Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Aluminum coagulants are widely used in arsenic (As) removal during the drinking water treatment process. Aluminium chloride ($AlCl_3$) and polyaluminium chloride (PACl) which contains high content of Al_{13} were used as coagulants. The effects of aluminum species, pH, humic acid (HA) and coexisting anions on arsenic removal were investigated. Results showed that $AlCl_3$ and PACl were almost ineffective in As(III) removal while the As(V) removal efficiency reached almost 100%. pH was an important influencing factor on the arsenic removal efficiency, because pH influenced the distribution of aluminum species during the coagulation process. The efficiency of arsenic removal by aluminum coagulants was positively correlated with the content of Al_{13} species. HA and some coexisting anions showed negative impact on arsenic removal because of the competitive adsorption. The negative influence of HA was more pronounced at low coagulant dosages. PO_4^{3-} and F^- showed marked influence during arsenic removal, but there was no obvious influence when SiO_3^{2-} , CO_3^{2-} and SO_4^{2-} coexisted. The present study would be helpful to direct arsenic removal by enhanced coagulation during the drinking water treatment.

Key words: arsenic; coagulation; aluminum coagulant; Al_{13} species; drinking water

砷是一种剧毒元素,广泛存在于自然界中,人类长期接触后将会面临患皮肤癌、膀胱癌等各类疾病的危险^[1~3]. 近年来,许多国家和地区的饮用水源均遭受不同程度的砷污染^[4~7]. 鉴于砷的危害及污染日益严重,我国 2006 年修订的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)规定砷的标准限值为 $10 \mu g \cdot L^{-1}$. 这对新型饮用水除砷技术的开发与应用以及除砷影响因素与机制研究方面提出了更高的要求.

目前国内外的除砷技术大致有混凝法、吸附法、离子交换法、膜分离法等. 混凝法具有成本低廉、易于操作、除砷效率高等优点,被广泛应用于饮用水除砷工艺中. 硫酸铝和聚合氯化铝等铝盐是混凝工艺中研究与应用最多的絮凝剂^[8]. 近几年有关铝絮凝

形态学的研究越来越受到人们的重视,铝形态与絮凝效能强化研究成为混凝领域研究的热点之一^[9,10]. 许多学者认为,混凝效能与混凝过程中絮凝剂水解形态的分布与转化有直接关系,目前认识比较一致的是认为 Al_{13} 形态是混凝过程中最有效的凝聚-絮凝成分^[11~14].

目前为止,人们在絮凝剂种类、投药量、pH 值、温度等方面对混凝除砷效能的影响做了大量研究,

收稿日期: 2012-10-22; 修订日期: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177144); 国家高新技术研究发展计划(863)项目(2012AA062604); 北京市教育委员会共建项目

作者简介: 陈桂霞(1987~),女,硕士,主要研究方向为水处理混凝技术与原理, E-mail: chen4189@163.com

* 通讯联系人, E-mail: czhu@cees.ac.cn

而关于铝形态对砷去除的影响研究还比较少,同时天然水体中的有机物及大量共存离子对混凝除砷效能是否产生影响也较少被人关注. 本研究主要针对上述问题,在混凝过程中铝絮凝形态转化对砷去除影响以及有机物和共存离子存在时对混凝效能的影响等方面展开深入研究.

1 材料与方法

1.1 实验水样与试剂

模拟水样:投药量、pH 值和腐殖酸(HA)影响实验均采用 1:1 的去离子水和自来水配置水样,共

表 1 水样水质特点

Table 1 Characteristics of water sample

pH (20℃)	浊度 /NTU	DOC /mg·L ⁻¹	As(V)/As(III) /μg·L ⁻¹	碱度(以 CaCO ₃ 计) /mg·L ⁻¹	硬度(以 CaCO ₃ 计) /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹
7.80 ± 0.05	0.18 ± 0.02	1.15	280.00	75.43	80.37	16.52	4.51

1.2 絮凝剂表征

实验用絮凝剂为三氯化铝(AlCl₃·6H₂O, 优级纯, 国药集团化学试剂有限公司)和电解法^[15]制备的聚合氯化铝(PACl), 絮凝剂特征指标见表 2.

总铝(Al_T)采用 ICP-AES(PerkinElmer, Optima 2000, UK)测定. 碱化度(B)采用碱式滴定法(具体

表 2 絮凝剂特征指标

Table 2 Characteristics of coagulants

絮凝剂	Al _T /mol·L ⁻¹	B	pH	Al _m /%	Al ₁₃ /%	Al _u /%
AlCl ₃	0.50	0.00	2.38	100.00	0.00	0.00
PACl	0.58	2.41	4.11	8.81	73.55	17.64

1.3 混凝实验

烧杯混凝实验于室温下在六连搅拌机(MY3000-6, 武汉梅宇仪器有限公司)上进行, 实验过程如下:取 400 mL 模拟水样于 500 mL 烧杯中, 以 200 r·min⁻¹ 预搅拌 30 s, 使水样混合均匀, 投药后以 250 r·min⁻¹ 快速搅拌 2 min, 40 r·min⁻¹ 慢速搅拌 15 min, 静置沉淀 30 min, 在液面以下 2 cm 处取样, 经 0.45 μm 滤膜过滤后分析砷浓度. 快速搅拌结束后立即取样测定 Zeta 电位(Zetasizer 2000, Malvern, UK). 混凝过程如需控制 pH 值, 在快速搅拌过程加入盐酸或氢氧化钠迅速调节. 采用紫外/可见分光光度计(Hitachi High-Technologies Co., Japan)测定 UV₂₅₄, 表示剩余腐殖酸浓度.

1.4 砷的测定

水样在 10% 盐酸的酸性条件下, 用硫脲还原五价砷, 用 2% 的盐酸和 10 g·L⁻¹ 的硼氢化钾(含 2

存离子影响实验采用去离子水配置水样, 所有水样原水砷[As(III)或As(V)]质量浓度均为 280 μg·L⁻¹. 1:1 的去离子水和自来水水样水质特点如表 1 所示.

实验试剂:As(III)和As(V)储备液分别采用亚砷酸钠(NaAsO₂)和十二水合砷酸钠(Na₃AsO₄·12H₂O)配置, 浓度均为 50 mmol·L⁻¹. As 的标准溶液购于国家标准物质中心. 腐殖酸(HA)、磷酸钠(Na₃PO₄)、氟化钠(NaF)、碳酸钠(Na₂CO₃)、硅酸钠(Na₂SiO₃)和硫酸钠(Na₂SO₄)等药品均为分析纯, 购于国药集团化学试剂有限公司.

方法见 GB 15892-2003)测定. 铝形态采用²⁷Al-核磁共振(²⁷Al NMR)法测定, 在 VARIANUNITY INOVA 型(500 MHz) NMR 谱仪上完成, 详细的分析方法参见文献[15]. 该方法可以定量得到 3 种铝形态含量, 分别是:铝单体 Al_m 形态、中聚体 Al₁₃ 形态、高聚体或胶体 Al_u 形态.

g·L⁻¹ 的氢氧化钾)作为载流液, 采用原子荧光光谱仪(AF-610, 北京瑞丽分析仪器有限公司)测定砷浓度. 仪器工作条件如下:负高压为 220 mV; HCl 主/辅助阴极电流为 50/0 mA; 原子化器温度为室温点火; 原子化方法为火焰法; 载气流量为 800 mL·min⁻¹; 泵速为 100 r·min⁻¹; 信号类型为峰面积; 测定方法为标准曲线法.

2 结果与讨论

2.1 投药量对砷去除的影响

图 1 为 AlCl₃ 和 PACl 在投药量(以 Al 计, 下同)为 0.0 ~ 8.0 mg·L⁻¹ 范围内对 As(III)和 As(V) 的去除效果和水中颗粒物 Zeta 电位变化情况, 图 2 为上述投药量下对应 pH 值的变化情况. 结果表明, 2 种絮凝剂对 As(III) 基本难以去除, 去除率低于 20%, 而对 As(V) 去除效果较好, 投药量为 2.0

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, AlCl_3 和 PACl 对 $\text{As}(\text{V})$ 去除率分别达到 96.37% 和 90.45%.

上述结果是由于 $\text{As}(\text{III})$ 和 $\text{As}(\text{V})$ 在水中的存在形态不同造成的. 天然水体中 $\text{As}(\text{III})$ 通常以不带电荷的 H_3AsO_3 形态存在, 而 $\text{As}(\text{V})$ 主要以带负电荷的 H_2AsO_4^- 和 HASO_4^{2-} 形态存在^[16]. 有研究者认为, 一般铝盐混凝过程主要通过压缩双电层、吸附电中和、吸附架桥、卷扫絮凝 4 种作用机制完成, 混凝除砷主要通过共沉淀和吸附两种作用机制完成^[17,18]. 由于 H_3AsO_3 为不带电荷的分子形态, 难与铝盐水解产物发生吸附及电中和作用, 而 H_2AsO_4^- 和 HASO_4^{2-} 为带负电荷的离子形态, 易与带正电荷的铝盐水解产物发生吸附电中和等作用. 因此, 铝盐对 $\text{As}(\text{III})$ 去除效果较差, 而对 $\text{As}(\text{V})$ 去除效果较好.

由图 1(a) 还可以看出, 在投药量为 $0.0 \sim 4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, AlCl_3 去除 $\text{As}(\text{V})$ 效果高于 PACl . 图 1(b) 显示, 2 种絮凝剂混凝后水中颗粒物 Zeta 电位变化差别较小, 对 $\text{As}(\text{V})$ 的去除不会造成很大影响. AlCl_3 的碱化度远小于 PACl , 因此混凝过程中 AlCl_3 消耗水中更多的碱度, 混凝后 AlCl_3 的水样 pH 值明显低于 PACl (图 2). pH 值对混凝过程中的铝形态分布和变化具有重要影响^[18,19], 这可能是导致两种絮凝剂混凝除砷效能差异的重要原因. 以下将重点研究 pH 值对混凝除砷的影响.

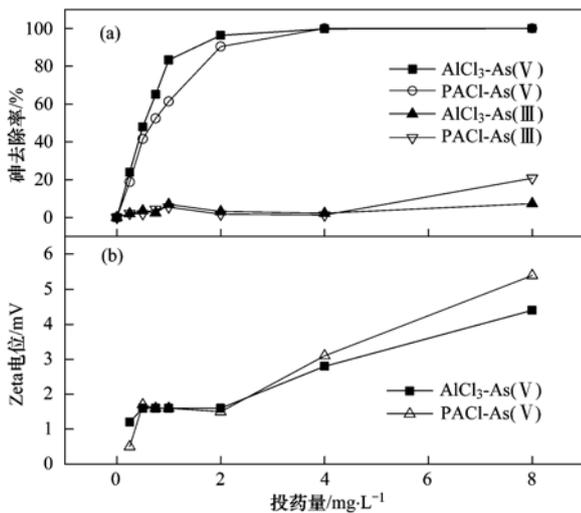


图 1 不同铝盐投药量下 $\text{As}(\text{III})$ 与 $\text{As}(\text{V})$ 去除效果和 Zeta 电位变化情况

Fig. 1 Removal of $\text{As}(\text{III})$ & $\text{As}(\text{V})$ and variation in Zeta potentials of water samples with different coagulant dosages

2.2 pH 对砷去除的影响

图 3 为不同 pH 条件下 AlCl_3 和 PACl 去除

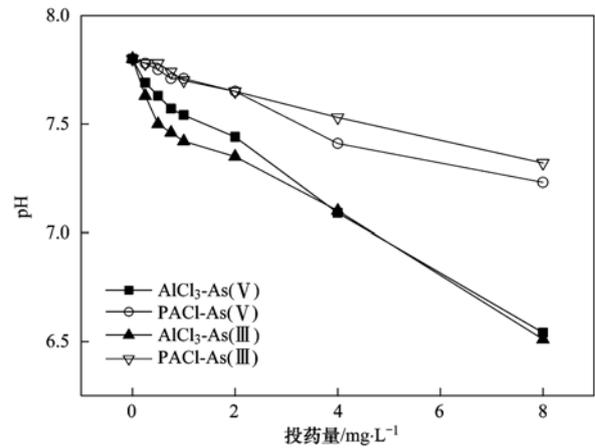


图 2 不同投药量下 pH 变化情况

Fig. 2 Variation in pH of water samples with different coagulant dosages

$\text{As}(\text{V})$ 情况, 絮凝剂投药量分别为 0.5 和 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 结果表明, AlCl_3 对 $\text{As}(\text{V})$ 的去除效率受 pH 影响较大. 当 $\text{pH}=4.0$ 时, AlCl_3 投药量为 0.5 和 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{As}(\text{V})$ 去除效率分别为 3.40% 和 12.33%; 当 pH 升至 5.0 时, 2 种投药量下 $\text{As}(\text{V})$ 去除效率分别高达 73.24% 和 100%; pH 升高到 7.0 以后, $\text{As}(\text{V})$ 去除率随 pH 值的升高而迅速下降. PACl 对 $\text{As}(\text{V})$ 的去除效率同样受 pH 值的影响, 变化规律与 AlCl_3 相似, 但受影响程度相对较小. pH 5.0~7.0 条件下, AlCl_3 除砷效果高于 PACl ; 当 pH 值小于 5.0 或者大于 7.0 时, PACl 除砷效果好于 AlCl_3 .

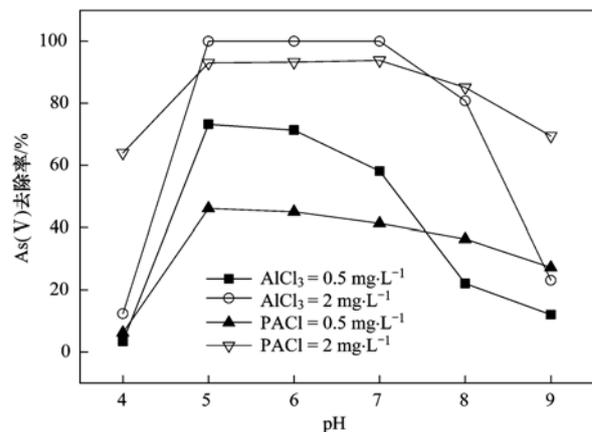


图 3 不同 pH 条件下 $\text{As}(\text{V})$ 去除情况

Fig. 3 Removal of $\text{As}(\text{V})$ with different coagulation pH

研究表明^[18,19], AlCl_3 在混凝过程中可以原位产生 Al_3 形态, Al 形态的分布与转化与 pH 值有关, 在弱酸性至中性 (pH 5.0~7.0) 条件下, 大量 Al_a 转化成 Al_{13} , 在酸性和碱性条件下又以 Al_a 为主要形

态;而 PACl 中的预制的 Al_{13} 形态在混凝过程中比较稳定,基本不受 pH 值变化的影响。 Al_{13} 分子量大而且整体电荷较高,吸附及电中和能力很强,不论是预制的还是原位生成的 Al_{13} 形态都被认为是混凝过程中最有效的凝聚-絮凝成分。研究发现^[18,20],铝盐混凝效果与混凝过程中的 Al_{13} 形态含量呈正比。在 pH 4.0~9.0 范围内,PACl 的水解形态比较稳定,始终以 Al_{13} 形态为主,在所研究的 pH 范围内对 As(V) 的絮凝去除效能相对稳定; $AlCl_3$ 在弱酸性至中性条件下原位水解生成大量 Al_{13} 形态,大大提升了对 As(V) 的絮凝效果,而在酸性和碱性条件下主要以二聚体和低聚体的 Al_n 形态为主,分子量及整体电荷较低,对 As(V) 絮凝效果较差(图 3)。在 pH 5.0~7.0 时, $AlCl_3$ 除砷效果大于 PACl。这是由于 $AlCl_3$ 原位水解生成的 Al_{13} 形态水解絮体粒径大,且具有比较大的孔容、孔径和比表面积,吸附能力强^[21,22],因此表现出更优异的絮凝效能。

2.3 天然有机物对砷去除的影响

研究水样中腐殖酸(HA)浓度(以 C 计)分别为 0.0、1.0 和 5.0 $mg \cdot L^{-1}$,用 UV_{254} 表示分别为 0.000、0.050 和 0.223 cm^{-1} 。 $AlCl_3$ 和 PACl 投药量分别为 1.0、2.0 和 4.0 $mg \cdot L^{-1}$ 。混凝过程 pH 值控制在 6.0。由图 4 可以看出,HA 存在时 As(V) 去除率下降。絮凝剂投药量越小,HA 对混凝效能影响越大。随着絮凝剂投药量的增加,As(V) 的去除受 HA 影响逐渐减弱,当投药量增加到 4.0 $mg \cdot L^{-1}$ 时,2 种絮凝剂对 As(V) 的去除率均在 90% 以上。图 4 和图 5 显示,HA 对 $AlCl_3$ 除 As(V) 的影响相对较小,而 2 种絮凝剂对 HA 的去除效果差别不大。

HA 易与絮凝剂表面羟基发生共聚络合反应^[23],从而对铝盐絮凝产生重要影响。HA 是一类具有复杂结构的大分子混合物,含有甲基、羧基、羟基等活性基团,在水中表现为负电性,可吸附在悬浮颗粒表面,对混凝过程及其效果产生重要影响^[24]。在弱酸性条件下,铝盐水解生成大量带有正电荷的羟基聚合物(主要为 Al_{13} 形态),这些羟基聚合物大多是一 OH 基不饱和化合态,易与 HA 上活性基团发生相互络合配位作用^[25]。混凝过程中 HA 存在时,其将与 As(V) 竞争铝水解产物表面羟基位点,导致 As(V) 去除率下降(图 4)。絮凝剂投药量较低时,絮凝剂表面羟基位点不足,HA 对 As(V) 去除影响较大;当絮凝剂投药量较大时,絮凝剂水解产物的吸附位点相对增加,HA 对絮凝除 As(V) 的影响减小。由

于混凝过程中 $AlCl_3$ 原位水解生成的 Al_{13} 形态的吸附容量较大^[18],这导致了 HA 对 $AlCl_3$ 除 As(V) 的影响小于对 PACl 的影响。

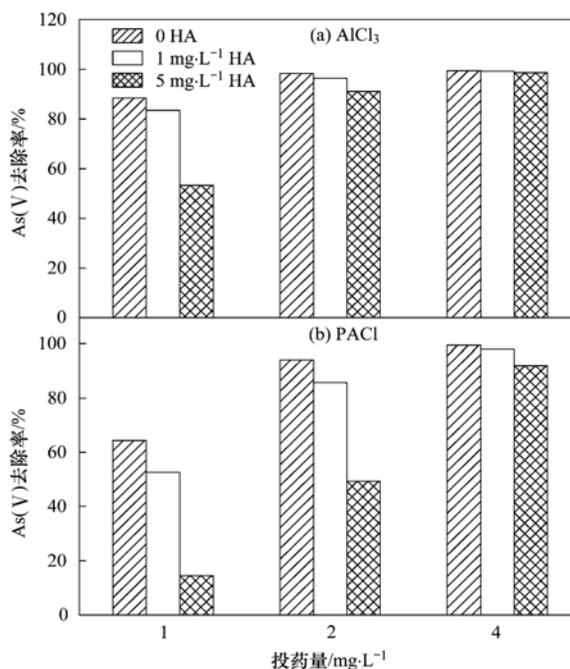


图 4 HA 对 $AlCl_3$ 和 PACl 混凝去除 As(V) 的影响

Fig. 4 Effect of HA on As(V) removal by $AlCl_3$ and PACl coagulation

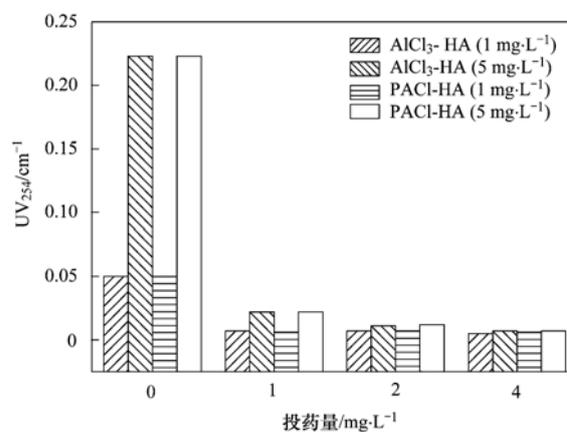


图 5 $AlCl_3$ 和 PACl 去除 HA 情况

Fig. 5 Removal of HA by $AlCl_3$ and PACl coagulation

2.4 共存离子对砷去除的影响

表 3 列出了几种共存阴离子对 As(V) 去除的影响,共存离子浓度分别为 0.1、1.0 和 10.0 $mmol \cdot L^{-1}$,混凝 pH 值为 6.0, $AlCl_3$ 和 PACl 投药量为 2.0 $mg \cdot L^{-1}$ 。如表 3 所示,共存离子对 As(V) 的去除效果因离子种类和浓度的不同而不同。 PO_4^{3-} 和 F^- 对 As(V) 的去除影响较大, PO_4^{3-} 和 F^- 离子浓度分别为 0.1 $mmol \cdot L^{-1}$ 和 1.0 $mmol \cdot L^{-1}$ 时,As(V) 去

除率均出现大幅度下降. SiO_3^{2-} 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 对 As(V) 的去除影响较小, 当这些离子浓度为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, As(V) 去除率未发生明显变化, 浓度进一步增加到 $10.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, As(V) 去除率才出现不同程度的下降.

表 3 共存阴离子对混凝去除 As(V) 的影响

Table 3 Removal of As(V) by coagulation in the presence of coexisting anions

共存离子	离子浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	As(V) 去除率/%	
		AlCl_3	PACl
PO_4^{3-}	0.10	2.05	1.82
	1.00	0.00	0.00
	10.00	0.00	0.00
F^-	0.10	86.38	43.00
	1.00	3.81	10.24
	10.00	0.00	0.00
SiO_3^{2-}	0.10	98.99	85.91
	1.00	92.30	80.60
	10.00	2.10	13.00
CO_3^{2-}	0.10	100.00	95.47
	1.00	98.32	90.51
	10.00	40.72	27.09
SO_4^{2-}	0.10	100.00	97.77
	1.00	99.10	90.44
	10.00	85.48	38.37

共存阴离子对混凝除 As(V) 产生负面影响是由于: 一方面阴离子在水中以电负性形式存在, 易与 As(V) 竞争吸附铝水解产物表面羟基位点; 另一方面阴离子与铝水解产物发生络合反应, 影响混凝效能. PO_4^{3-} 和 F^- 离子对 As(V) 的去除影响大. 主要是因为磷和砷位于同一主族, 磷酸根和砷酸根结构性质非常接近, 易竞争絮凝剂表面羟基; F^- 离子电负性强, 能够与铝盐水解产物迅速发生配位络合反应, 从而降低铝水解产物电荷密度, 减弱了絮体对 As(V) 的吸附作用, 同时 F^- 还会与 As(V) 竞争絮体表面吸附位点, 从而会导致 As(V) 去除率下降. SiO_3^{2-} 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 与铝盐水解产物络合能力较弱, 对 As(V) 的去除的影响较小(表 3).

3 结论

(1) 铝盐难以去除 As(III) , 去除率小于 20%, 对 As(V) 去除效果较好, 最高去除率可达近 100%.

(2) pH 是影响铝盐混凝去除 As(V) 的重要因素, 混凝效果最佳 pH 范围为 $5.0 \sim 7.0$, 这与 Al_{13} 形态原位水解生成的最佳 pH 环境一致. 不论是预制或原位生成的 Al_{13} 形态, 其与铝盐混凝除砷效能呈正比.

(3) HA 存在时 As(V) 去除率下降, 增加絮凝剂投加量可以减少其负面影响. 共存离子对铝盐混凝去除 As(V) 的影响因种类和浓度的不同而不同, PO_4^{3-} 和 F^- 对 As(V) 的去除影响较大, SiO_3^{2-} 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 影响较小.

参考文献:

- [1] Ng J C, Wang J P, Shraim A. A global health problem caused by arsenic from natural sources [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(9): 1353-1359.
- [2] Jain C K, Ali I. Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques [J]. *Water Research*, 2000, **34**(17): 4304-4312.
- [3] Das D, Chatterjee A, Mandal B K, *et al.* Arsenic in ground water in six districts of West Bengal, India: the biggest arsenic calamity in the world. Part 2. Arsenic concentration in drinking water, hair, nails, urine, skin-scale and liver tissue (biopsy) of the affected people [J]. *Analyst*, 1995, **120**(3): 917-924.
- [4] 张微, 王骋, 于光前, 等. 2010 年全国饮水型地方性砷中毒监测报告[J]. *中国地方病学杂志*, 2012, **31**(1): 55-59.
- [5] Koch I, Feldmann J, Wang L X, *et al.* Arsenic in the Meager Creek hot springs environment, British Columbia, Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **236**(1-3): 101-117.
- [6] Chandrasekharam D. Scenario of arsenic pollution in groundwater; West Bengal [J]. *Geology in China*, 2010, **37**(3): 712-722.
- [7] 金银龙, 梁超轲, 何公理, 等. 中国地方性砷中毒分布调查(总报告)[J]. *卫生研究*, 2003, **32**(6): 519-539.
- [8] Duan J M, Gregory J. Coagulation by hydrolyzing metal salts [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, **100-102**: 475-502.
- [9] Lin J L, Chin C J M, Huang C, *et al.* Coagulation behavior of Al_{13} aggregates [J]. *Water Research*, 2008, **42**(16): 4281-4290.
- [10] Gao B Y, Chu Y B, Yue Q Y, *et al.* Characterization and coagulation of a polyaluminum chloride (PAC) coagulant with high Al_{13} content [J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **76**(2): 143-147.
- [11] 胡承志, 刘会娟, 曲久辉. Al_{13} 形态在混凝中的作用机制 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 103-107.
- [12] Zhao H Z, Peng J X, Lin S S, *et al.* Covalently bound organic silicate aluminum hybrid coagulants: preparation, characterization, and coagulation behavior [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(6): 2041-2046.
- [13] Xu W Y, Gao B Y, Wang Y, *et al.* Effect of second coagulant addition on coagulation efficiency, floc properties and residual Al for humic acid treatment by Al_{13} polymer and polyaluminum chloride (PACl) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **215-216**: 129-137.
- [14] 许伟颖, 高宝玉, 王燕, 等. Al_b 形态处理模拟染料废水的效果及机制研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 117-123.
- [15] Liu H J, Qu J H, Hu C Z, *et al.* Characteristics of nanosized

- polyaluminum chloride coagulant prepared by electrolysis process [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2003, **216**(1-3): 139-147.
- [16] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(5): 517-568.
- [17] 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.
- [18] Hu C Z, Liu H J, Chen G X, *et al.* Effect of aluminum speciation on arsenic removal during coagulation process [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, **86**: 35-40.
- [19] Zhao H, Liu H J, Hu C Z, *et al.* Effect of aluminum speciation and structure characterization on preferential removal of disinfection byproduct precursors by aluminum hydroxide coagulation [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(13): 5067-5072.
- [20] Lin J L, Huang C, Pan J R, *et al.* Effect of Al(III) speciation on coagulation of highly turbid water [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(2): 189-196.
- [21] Wang Y, Gao B Y, Xu X M, *et al.* Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, **332**(2): 354-359.
- [22] Hu C Z, Chen G X, Liu H J, *et al.* Characterization of flocs generated by preformed and in situ formed Al_{13} polymer [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **197**: 10-15.
- [23] 金鹏康, 王晓昌. 腐殖酸-铝盐共聚络合反应特性[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(1): 40-43.
- [24] 曲久辉. 水中天然有机大分子对混凝影响的电动特征[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(2): 160-166.
- [25] 刘红, 王东升, 吕春华, 等. Al_{13} 去除水中腐殖酸的混凝作用机理[J]. *环境化学*, 2005, **24**(2): 121-124.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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