

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM<sub>2.5</sub> 清除作用 ..... 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 ..... 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 ..... 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 ..... 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 氧化性损伤能力研究 ..... 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM<sub>2.5</sub> 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 ..... 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM<sub>2.5</sub> 的统计特性 ..... 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM<sub>2.5</sub> 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 ..... 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 ..... 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 ..... 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 ..... 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 ..... 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 ..... 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 ..... 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 ..... 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 ..... 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 ..... 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 ..... 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 ..... 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 ..... 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 ..... 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 ..... 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 ..... 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 ..... 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 ..... 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性 ..... 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 ..... 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 ..... 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O<sub>3</sub>/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 ..... 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 ..... 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 ..... 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 ..... 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 ..... 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 ..... 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 ..... 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 ..... 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 ..... 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 ..... 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 ..... 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 ..... 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 ..... 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 ..... 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 ..... 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 ..... 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 ..... 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 ..... 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 ..... 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 ..... 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 ..... 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 ..... 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

# 聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响

赵园园<sup>1,2</sup>, 张玥<sup>2</sup>, 李素英<sup>1</sup>, 石宝友<sup>2\*</sup>, 李贵伟<sup>2</sup>, 孙改清<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 中国科学院生态环境研究中心饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 针对给水管网中残余铝沉积和再溶解现象可能引起的水质问题, 研究了聚硅酸对不同水解聚合形态铝沉积、再溶解的影响, 并以石英微晶天平为表征手段, 初步探讨了聚硅酸对不同形态铝沉积、再溶解过程影响的机理。结果表明, 聚硅酸能显著改变不同水解聚合形态铝的沉积、再溶解行为。聚硅酸可与 3 种水解聚合形态的铝迅速结合而生成可沉积产物, 但产物性质不同。以单体形态为主的  $Al_0$  与聚硅酸的反应产物性质较稳定, 部分以溶解态存在, 部分以非溶解态(可沉积态)存在; 尽管铝的两种聚合形态  $Al_{13}$  和  $Al_{30}$  与聚硅酸反应也生成了部分可沉积产物, 但随着时间的推移, 这些产物又逐渐向溶解态转化。铝硅比对  $Al_0$  体系中铝的沉积溶解行为影响较小, 而对  $Al_{13}$  和  $Al_{30}$  影响较大, 且在 0.2:20(以 Al 和  $SiO_2$  计的质量比)时, 沉积态铝的溶解速率最快。

**关键词:** 铝沉积; 给水管网; 聚合氯化铝; 聚硅酸; 铝硅比

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3870-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.10.027

## Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species

ZHAO Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue<sup>2</sup>, LI Su-ying<sup>1</sup>, SHI Bao-you<sup>2\*</sup>, LI Gui-wei<sup>2</sup>, SUN Gai-qing<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** To understand the water quality problems caused by deposition and re-dissolution behaviors of residual aluminum in drinking water distribution system (DWDS), the effect of polysilicic acid on the deposition and re-dissolution behaviors of different aluminum species was investigated by using jar tests and quartz crystal microbalance, which could demonstrate the deposition behavior of different aluminum species and the physico-chemical properties of deposited layers. The results showed that the effect of polysilicic acid on the deposition behavior of different aluminum species was significant.  $Al_0$  (mainly monomeric species),  $Al_{13}$  and  $Al_{30}$  (polymeric species) could react rapidly with polysilicic acid, and some insoluble products formed. However, the stability of insoluble products from different aluminum species was distinct. The insoluble product formed by reaction of  $Al_0$  with polysilicic acid was relatively stable. With regard to the systems of polysilicic acid with  $Al_{13}$  and  $Al_{30}$ , the dissolved aluminum concentration increased with reaction time, which indicated that the deposited product could be gradually transformed to soluble monomeric or oligomeric aluminum species. Compared with the influence of Al/Si ratio on  $Al_0$ , the ratio of aluminum to silicon significantly affected the deposition and re-dissolution behavior of  $Al_{13}$  and  $Al_{30}$ , and the re-dissolution rate of insoluble aluminum was the most rapid when the ratio of aluminum with silica was 0.2:20 (as mass ratio of Al to  $SiO_2$ ).

**Key words:** aluminum deposition; drinking water distribution system; poly-aluminum chloride (PACl); polysilicic acid; ratio of aluminum to silica

近年来饮用水残余铝问题逐渐引起广泛关注。人体摄入过量的铝, 可能会引起中枢神经系统、心血管疾病以及骨骼、肌肉变形等<sup>[1]</sup>。饮用水中的铝主要来自于两方面: 一是水源中的铝, 铝是地壳中第三大含量的元素, 约占地壳总质量的 8%<sup>[2]</sup>。采矿及冶炼行业排放的含铝废矿水经由各种途径汇入作为水源水的江河、湖泊及水库之中, 会导致水源中铝含量增加<sup>[3]</sup>; 二是铝盐混凝剂在水处理过程中絮凝、沉淀、过滤后的残余, 该情况多见于地表水处理<sup>[2]</sup>。我国大部分水厂使用聚合氯化铝和硫酸铝

等作为混凝剂<sup>[4]</sup>, 其中聚合氯化铝以其优良的混凝性能被广泛使用。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 中规定饮用水中铝含量不得高于  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。然而, 一份针对我国 40 座城市饮用水水质的调查结果显示, 32.5% 的城市饮用水中铝浓度超出国家标准限值, 以东北地区为甚<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2016-03-04; 修订日期: 2016-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378493); 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室专项(15Z08KLDWST)

作者简介: 赵园园(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水管网水质, E-mail: quanquan3000@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: byshi@cees.ac.cn

张玥等<sup>[6]</sup>的研究发现,给水管网管垢(特别是在表层疏松沉积物)中有较高的铝含量,同时发现,管垢样品中铝含量与硅含量呈显著的正相关关系.硅是天然水体中的重要组成元素,也是自然界中多种矿物的主要组成元素.聚硅酸是硅酸钠在酸性条件下水解、聚合反应得到的一种可溶性胶体产物,其独特的网状立体结构和较高分子量使之具有一定的黏结能力和吸附架桥作用<sup>[7]</sup>,可对水中可溶性物质、胶体物质和悬浮物质等进行吸附、交联和包裹,并通过胶粒间氢键、电中和而使之凝聚,且当水体中存在聚铝时,这种作用得到极大加强<sup>[8]</sup>.因此,聚硅酸作为助凝剂广泛应用于水质净化处理中<sup>[9]</sup>.关于铝和硅的相互作用,Her<sup>[10]</sup>研究发现,硅在 pH = 8.0 时的溶解度会随着铝浓度的升高而显著降低,铝硅酸盐的形成导致铝和硅含量的降低.然而,目前针对给水管网中硅对铝不同形态转化和沉积影响的研究还几乎未见报道.

在给水管网中,铝的沉积和释放不仅与出厂水余铝浓度和其在管壁的沉积量有关,还与其赋存形态、稳定性有关.本文以水中溶解态硅对残余铝的影响为出发点,研究了聚硅酸对不同水解聚合形态铝的沉积、再溶解行为的影响,考察了铝硅比与形态转化速率的关系,并对聚硅酸与不同形态铝之间的作用机制进行了初步探讨,以期为保障饮用水水质安全提供理论指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 不同铝形态储备液的制备

3 种含有不同铝形态 ( $Al_0$ 、 $Al_{13}$ 、 $Al_{30}$ ) 储备液的制备方法如下.

$Al_0$ : 直接溶解一定量的  $AlCl_3 \cdot 6H_2O$  于 100 mL Milli-Q 水中. 单体铝及低聚态铝为其主要成分.

$Al_{13}$ : 首先用慢速滴碱法制备碱化度为 2.0 ( $[OH^-]/[Al]$ , 摩尔比) 的聚合氯化铝, 具体步骤为: 一定量  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的氢氧化钠溶液在高速搅拌下缓慢滴加到一定浓度的  $AlCl_3$  溶液中, 得到碱化度为 2.0 的聚合氯化铝. 将一定量的  $Na_2SO_4$  与制得的聚合氯化铝混合, 静置 24 h, 而后快速过滤, 得到沉淀. 将  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $BaCl_2$  溶液加入到沉淀中, 快速搅拌 3 h. 静置 10 min, 过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜, 即得到  $Al_{13}$  储备液, 在  $4^\circ\text{C}$  下保存<sup>[11]</sup>.

$Al_{30}$ :  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $AlCl_3$  溶液中加入一定量的  $Na_2CO_3$  粉末, 使得  $n(Na_2CO_3)/n(Al^{3+}) = 1.15$ , 于  $80^\circ\text{C}$  加热至固体全部溶解, 稀释 10 倍后静置 12 h,

得到碱化度为 2.3 的聚合氯化铝. 而后在  $95^\circ\text{C}$  下加热 48 h, 加入  $[SO_4^{2-}]:[Al^{3+}] = 0.33$  的硫酸钠粉末, 室温下放置一周, 在沉淀中加入  $Ba(NO_3)_2$  溶液, 超声 30 min 后, 静置 4 h, 取上清液过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜, 得到  $Al_{30}$  储备液<sup>[12]</sup>.

不同聚合形态铝 ( $Al_a$ 、 $Al_b$  和  $Al_c$ ) 是基于显色剂 Ferron 与  $Al^{3+}$  以及它的水解聚合形态发生络合络合反应速率的差异进行相对的区别, 即: 单体和低聚形态  $Al_a$ , 是 1 min 内与 Ferron 瞬时反应的部分; 聚合形态  $Al_b$ , 是与 Ferron 缓慢反应的部分; 溶胶或凝胶聚合物  $Al(OH)_3$ , 是与 Ferron 反应十分缓慢或基本不反应的部分. 实验中的 3 种含有不同铝形态的储备液  $Al_0$ 、 $Al_{13}$ 、 $Al_{30}$  的总铝浓度及对应的不同聚合形态铝 ( $Al_a$ 、 $Al_b$  和  $Al_c$ ) 的分布 (利用 Ferron 逐时络合比色法<sup>[13]</sup> 进行表征) 如表 1 所示<sup>[14]</sup>.

表 1 不同储备液中铝形态分布  
Table 1 Speciation distribution of stock solutions with different aluminum species

类型	浓度 $\times 10^{-3} / \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$Al_a$ /%	$Al_b$ /%	$Al_c$ /%
$Al_0$	50.00	92.68	7.06	0.26
$Al_{13}$	21.62	13.10	83.35	3.55
$Al_{30}$	28.67	7.07	7.05	85.88

### 1.2 聚硅酸储备液的制备

称取一定量的硅酸钠固体粉末, 加入 500 mL 容量瓶中, 使定容后溶液的硅酸含量 (以  $SiO_2$  计) 为  $5.00 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 然后, 通过加入浓硝酸将高浓度硅酸溶液的 pH 调至 7.00, 以备使用. 采用此法制得的硅酸主要以低聚态形式存在<sup>[15]</sup>.

### 1.3 烧杯实验

作为针对给水管网中硅对残余铝影响的初步探索, 本研究用相对简单的烧杯实验对不同铝形态的沉积和再溶解行为进行研究. 并且设置静置和  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  搅拌状态两组实验进行对照<sup>[14]</sup>, 采用封口膜 (Parafilm) 对烧杯密封.

用 Milli-Q 水及  $Al_0$ 、 $Al_{13}$  和  $Al_{30}$  储备液分别配置  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (以 Al 计)  $Al_0$ 、 $Al_{13}$  和  $Al_{30}$  溶液, 另外分别投加  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $NaHCO_3$  和  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $NaNO_3$  作为缓冲试剂并达到一定的离子强度. 通过滴加 HCl 和 NaOH 溶液调节溶液 pH 至 7.7. 每天同一时间取样 (取样时, 搅拌组继续保持搅拌状态), 测定其总铝浓度及溶铝浓度, 连续取样 7 d.

## 1.4 铝形态分级

水样直接经过硝酸酸化后,测定得到总铝浓度 A,水样经过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤,酸化后测定得到溶解态铝 B. 颗粒态铝为未通过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜的铝含量,通过 A 减 B 计算得到. 沉积态铝含量,也包括吸附态铝含量,通过投加量减去总铝浓度 A 计算得到. 投加量减去溶解态铝 B 得到沉积铝和颗粒态铝的总和,即非溶解态铝. 非溶解态铝均视为可沉积态铝,包括已沉积在容器壁上的铝和体系中尚未沉积的颗粒态铝. 铝测定方法为铬天青 S 分光光度法<sup>[16]</sup>.

本研究所用试剂均不低于化学纯级别,超纯水 (Milli-Q) 用于清洗及制备溶液.

## 1.5 石英微晶天平 (QCM-D) 表征

石英晶体微天平 (QCM-D) 作为微质量传感器具有结构简单、成本低和测量精度高 (可以达到纳克量级) 的优点,被广泛应用于化学、物理、生物、医学和表面科学等领域<sup>[17]</sup>. 通过测量耗散系数 (dissipation,  $D$ ), 能够获得更多关于表面上吸附的薄膜的性质,从而极大地丰富薄膜的表面信息,为研究微观变化过程,破译微观作用机制提供了一种强有力的手段.

用石英微晶天平 (E4, Q-Sense, 瑞典) 对不同形态铝在惰性界面沉积层的性质进行表征,使用 5-MHz AT-cut 镀金表面石英晶体传感器 (Qsx 301, Q-Sense). 将传感器放入控温样品池内,传感器被固定在有进口和出口的可拆卸流动池中. 实验测定前,根据 Q-Sense 推荐步骤清洗芯片及组件. 实验温度控制在  $20^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ , 样品流速为  $150 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 以保证溶液通过传感器时为层流状态,并且避免产生气泡<sup>[18]</sup>. 本实验开始时首先通入空气来检验系统是否达到稳定状态. 达到稳定状态后,通入 Milli-Q 水建立基线,用于消除背景,然后通入待测样,实时记录实验中不同倍频下石英晶体传感器的频率及耗散响应.

沉积实验中,在 4 个倍频 ( $n = 3, 5, 7, 9$ ) 下记录共振频率及耗散因子. 对于均质刚性膜,根据 Sauerbrey 方程,沉积量 ( $\Delta m$ ) 与共振频率变化量 ( $\Delta f = f - f_0$ ) 成正比<sup>[19]</sup>.

Sauerbrey 方程:

$$\Delta m = -\frac{C_{\text{QCM}}}{n} \Delta f \quad (1)$$

式中,  $\Delta m$  为沉积量 (kg),  $C_{\text{QCM}}$  为敏感度常数 [ $17.7 \text{ ng} \cdot (\text{Hz} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$ ],  $n$  为倍频数 (1, 3, 5, 7, ...),  $\Delta f$  为

共振频率变化量 (Hz). 对于软膜和黏弹性膜,运用 Voigt 模型在多种倍频下拟合共振频率变化 ( $\Delta f$ ) 及耗散因子 ( $\Delta D$ ) 得到沉积量及沉积层的性质 (例如密度、厚度、剪切弹性模量和黏弹性)<sup>[19]</sup>. 在 Voigt 模型中,固定参数流体密度为  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 流体黏度为  $0.001 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ , 沉积层密度假定为  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 聚硅酸对不同形态铝的影响

图 1 分别为静置和搅拌状态下,  $\text{Al}_0$ 、 $\text{Al}_{13}$ 、 $\text{Al}_{30}$  与聚硅酸反应体系中溶铝随反应时间的变化情况,硅酸浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 从中可知,投加聚硅酸后,3 个体系的趋势与未投加聚硅酸相比,均发生了一定的变化,溶铝浓度在 1 d 内迅速下降至  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右,而后随着时间呈现不同程度的上升趋势. 在  $\text{Al}_0$  与聚硅酸反应体系中,溶铝浓度在 1 d 内降至  $0.085 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右,而后出现极缓慢上升. 而  $\text{Al}_{13}$  与聚硅酸体系在静置和搅拌状态的溶铝浓度在 1 d 内分别降至  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 与  $\text{Al}_0$  与聚硅酸体系相比,溶铝浓度在随后的几天时间内出现较大程度的增加,且在第 7 d 时,溶铝浓度增至  $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右. 在  $\text{Al}_{30}$  与聚硅酸体系中,溶铝浓度由第 1 d 的  $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增至  $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

在未投加聚硅酸的体系中,  $\text{Al}_{13}$  和  $\text{Al}_{30}$  的溶铝浓度在静置和搅拌状态均迅速下降至  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而后保持稳定,而  $\text{Al}_0$  体系中,其浓度保持基本不变. 与未投加聚硅酸的体系相比,当体系中引入聚硅酸后,铝浓度呈现不同的变化趋势,推测是由于聚硅酸与不同形态铝发生反应或共沉淀导致的. 王文东等<sup>[15]</sup> 研究发现,聚硅酸与单核铝反应可生成具有一定溶解性的硅铝酸盐 (HAS). 因此,在  $\text{Al}_0$  与聚硅酸体系中,低聚态铝易与聚硅酸反应转化为硅铝酸盐,由于硅铝酸盐具有一定的溶解度,部分以可溶性硅铝酸盐形态存在于溶液中,超出溶解度部分则以沉淀形式存在,且体系在较短时间内达到平衡,随时间变化较小. 对于聚合度较高的  $\text{Al}_{13}$  及  $\text{Al}_{30}$  体系,由于聚硅酸带负电荷,而  $\text{Al}_{13}$  与  $\text{Al}_{30}$  均为聚合阳离子,因此  $\text{Al}_{13}$ 、 $\text{Al}_{30}$  会与聚硅酸发生电中和反应而沉积下来,造成溶液中铝浓度显著下降. 而据研究发现,弱碱性环境有利于多核铝向单核铝转化,并与硅酸反应生成具有一定溶解性的 HAS,使得溶液中溶解态铝浓度升高<sup>[15]</sup>. 由于体系中含有较高浓度的多核铝及悬浮铝,且溶液偏弱碱性,促

进了体系中多核铝随时间缓慢解离并与硅酸结合，使得溶液中铝含量逐渐上升。

0.4)<sup>[20]</sup>。pH 的下降也进一步验证了铝与聚硅酸的反应。

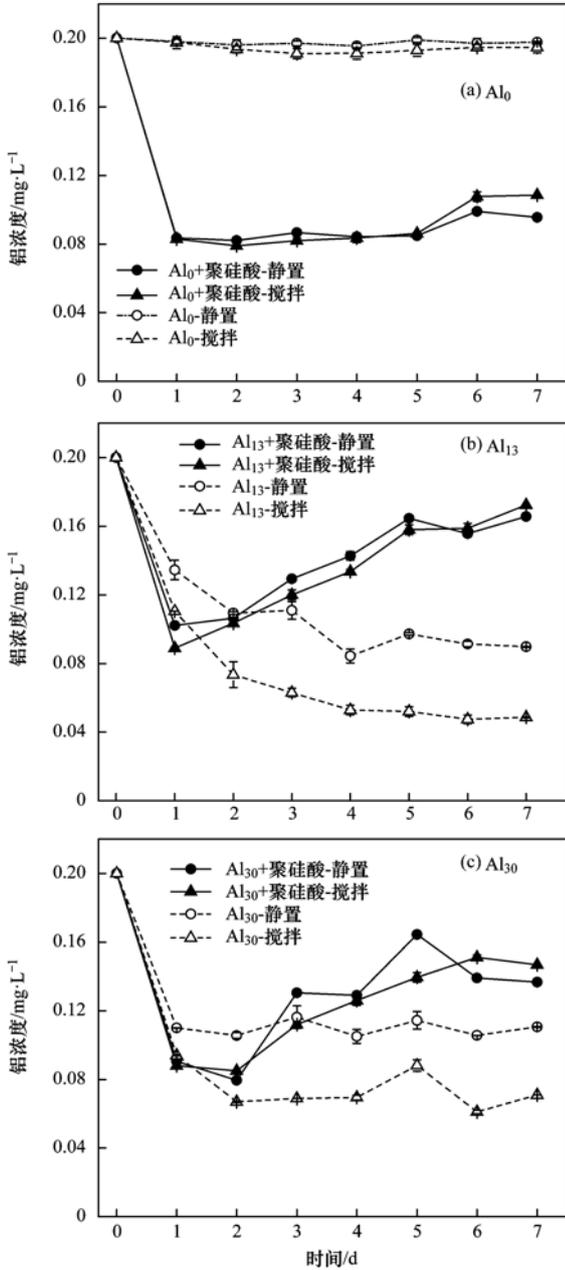


图1 聚硅酸对不同形态铝体系中溶铝浓度的影响

Fig. 1 Effect of polysilicic acid on soluble Al in aqueous systems with different aluminum species

未投加聚硅酸的  $Al_{13}$  和  $Al_{30}$  体系中，在静置状态下的总铝和溶铝浓度明显高于搅拌状态，说明搅拌会强化铝的沉积，且能加速反应达到平衡<sup>[5]</sup>。由图1、图2中可以看出，在引入聚硅酸后，总铝和溶铝在静置和搅拌两种状态下有着相似的变化规律且变化量基本相等，表明投加聚硅酸后，铝与聚硅酸的作用不易受水力条件的影响。表2为反应前后体系pH的变化，pH出现一定幅度的降低 ( $\Delta pH \leq$

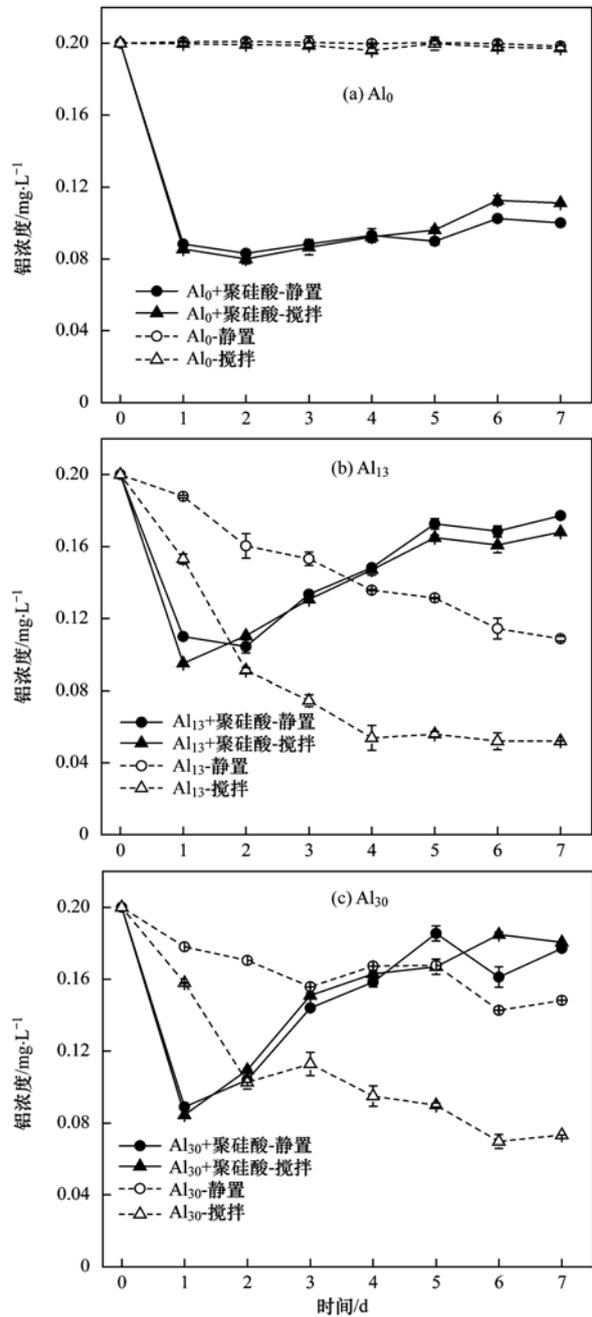


图2 聚硅酸对不同形态铝体系中总铝浓度的影响

Fig. 2 Effect of polysilicic acid on total-Al in aqueous systems with different aluminum species

表2 反应前后体系 pH 变化

Table 2 The pH change before and after the reactions

体系类型	反应前体系的 pH	反应后体系的 pH	$\Delta pH$
聚硅酸 + $Al_0$	7.70	7.42	-0.28
聚硅酸 + $Al_{13}$	7.70	7.30	-0.40
聚硅酸 + $Al_{30}$	7.69	7.31	-0.38

## 2.2 铝硅比对不同形态铝转化的影响

图3为铝硅比对不同形态铝体系中非溶解态铝浓度的影响. 其中,聚硅酸投加量为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (以  $\text{SiO}_2$  计),不同形态铝投加量由  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增至  $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (以 Al 计). 结果表明,铝硅比对不同形态铝体系的影响有显著不同. 在  $\text{Al}_0$  体系中,投加聚硅酸后,非溶解态铝含量在 24 h 内已达到平衡( $\text{Al}_0$  投加量为  $0.1 \sim 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间和  $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,

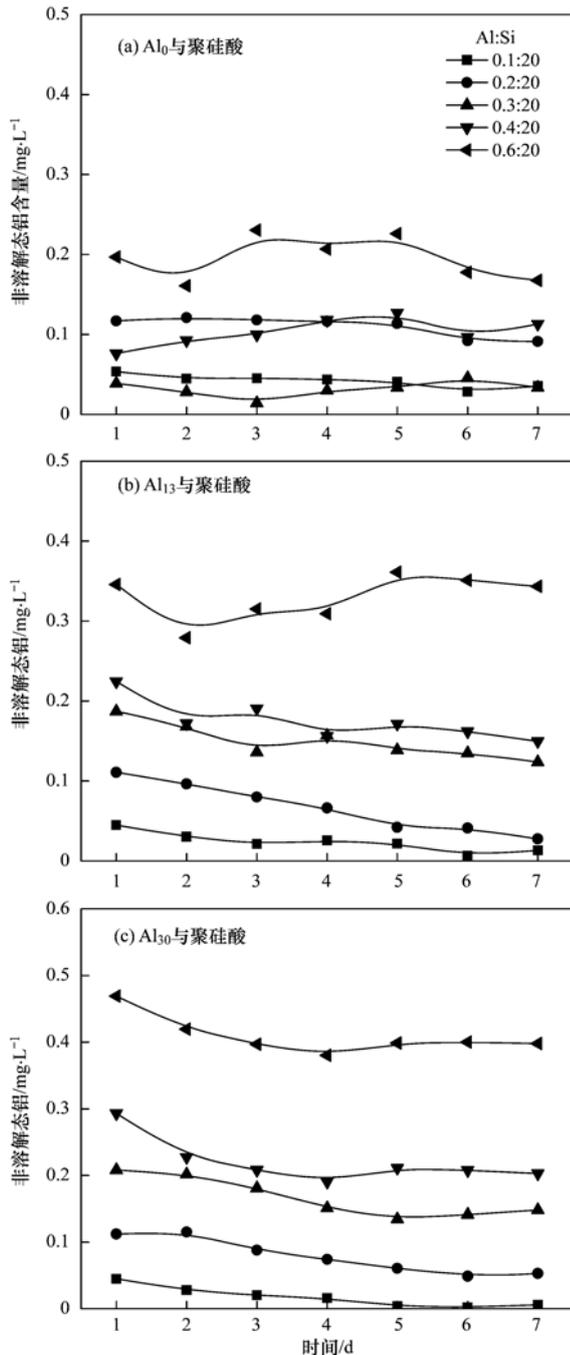


图3 铝硅比对不同形态铝体系中非溶解态铝浓度的影响  
Fig. 3 Effect of Al: Si ratio on the content of insoluble-Al in systems with different aluminum species

非溶解态铝约为  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右), 其后变化不大. 增加  $\text{Al}_0$  投加量,非溶解态铝含量出现较小幅度的上升. 推测聚硅酸一定时,增加  $\text{Al}_0$  投加量,聚硅酸逐渐反应完全,此时,继续投加  $\text{Al}_0$ ,非溶解态铝含量变化不大,且呈现较稳定的状态. 高宝玉等<sup>[21]</sup>发现聚硅酸与铝离子不存在定量的作用关系. 在  $\text{Al}_0$  与聚硅酸体系中,铝在反应前主要以单核铝或低聚态形式存在,容易与硅酸反应转化为溶解度较高的硅铝酸盐,因此体系在较短的时间内便达到稳定.

当投加聚硅酸后, $\text{Al}_{13}$ 和  $\text{Al}_{30}$ 体系有着相似的变化规律. 铝投加量由  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到  $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,非溶解态铝含量逐渐增加. pH 为 7.7 有利于多核铝向单核铝转化并与硅酸反应形成具有一定溶解度的 HAS,使得非溶解态铝逐渐溶解,溶液中的溶解铝浓度升高<sup>[15]</sup>. 所以,在  $\text{Al}_{13}$ 和  $\text{Al}_{30}$ 溶液投加聚硅酸后,由于聚合铝的团聚有着较好的稳定性,多核铝向单核铝转化并与硅酸反应形成 HAS 需要更长的时间,使得溶液中的非溶解态铝浓度出现较小幅度的下降.

图4为铝硅比对不同形态铝体系中非溶解态铝浓度溶解速率的影响.  $\text{Al}_0$  体系中非溶解态铝溶解速率较慢,说明其体系在较短时间内已趋于稳定. 在聚合氯化铝体系中,多核铝向单核铝转化并与硅酸反应形成可溶性 HAS 反应速率较慢. 在  $\text{Al}_{13}$ 与聚硅酸体系中,铝硅比为 0.2:20 时,非溶解态铝的溶解速率高于其他铝硅比. 在  $\text{Al}_{30}$ 与聚硅酸体系中,铝的投加量在  $0.2 \sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其非溶解态铝的溶解速率也最快.

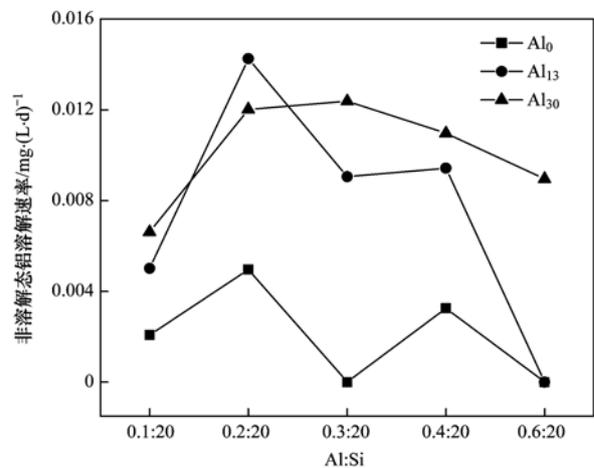


图4 铝硅比对不同形态铝体系中非溶解态铝溶解速率的影响  
Fig. 4 Effect of Al: Si ratio on the dissolution rate of insoluble-Al in systems of different aluminum species

### 2.3 石英微晶天平对铝沉积过程的分析

图 5 为利用石英微晶天平观察到的 3 种形态铝与聚硅酸复合体系的沉积特征。加入聚硅酸后,  $Al_0$  体系中共振频率迅速显著下降, 耗散因子则相应地迅速增加。共振频率的立刻下降说明  $Al_0$  与聚硅酸的结合物在芯片表面迅速沉积, 而耗散因子增加量相对较高, 说明沉积膜为偏软性含水膜。图 5(b) 和 5(c) 为加入聚硅酸后  $Al_{13}$  和  $Al_{30}$  体系中共振频率及耗散因子的变化情况, 其共振频率下降幅度较小, 说明石英微晶天平表面检测到少量的沉积。  $Al_{13}$  体系中耗散因子随时间逐渐增加, 其沉积膜为偏软性膜。而在  $Al_{30}$  体系中, 不同倍频下耗散因子值相差较小, 这种对不同倍频的较弱敏感性也说明  $Al_{30}$  沉积膜偏

硬质膜<sup>[22]</sup>。

在烧杯实验中, 加入聚硅酸后, 3 个体系中总铝及总溶铝浓度迅速下降, 接近 50% 的铝沉积在杯壁。 QCM-D 表征结果说明,  $Al_0$  与聚硅酸在石英晶体传感器表面迅速沉积, 且在 10 min 左右达到平衡, 此现象与烧杯实验结果一致。说明低聚态铝与聚硅酸结合形成聚硅铝盐而部分沉淀。而对于  $Al_{13}$  与聚硅酸体系、  $Al_{30}$  与聚硅酸体系, 仅有少量铝沉积于石英微晶表面, 这与烧杯实验结果不符。推测可能是由于聚硅酸与  $Al_{13}$ 、  $Al_{30}$  发生电中和反应, 反应速率较快, 溶液在通入石英微晶天平之前就已发生电中和反应而沉淀, 因此仅有少量铝硅结合物通过传感器而发生沉淀。这一现象还需要今后更多的研究来证实。

### 3 结论

(1)  $Al_0$  与聚硅酸作用可生成具有一定溶解性的硅铝酸盐 (HAS), 部分沉积, 部分以可溶性硅铝酸盐形态存在于溶液中, 且其反应迅速, 体系稳定, 随时间变化较小。

(2) 对于  $Al_{13}$  与聚硅酸、  $Al_{30}$  与聚硅酸两个体系, 由于  $Al_{13}$  与  $Al_{30}$  均为聚合阳离子, 而聚硅酸带负电荷, 因此  $Al_{13}$ 、  $Al_{30}$  会与聚硅酸发生电中和反应而沉积下来, 造成溶液中铝浓度显著下降。但随着时间的变化, 体系中多核铝逐渐向单核铝转化, 并与硅酸反应生成可溶性 HAS, 使得溶液中溶解态铝浓度升高。

(3) 铝硅比对不同形态铝的沉积溶解行为影响不同。当聚硅酸浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 铝硅比对  $Al_0$  影响不大; 在  $Al_{13}$  和  $Al_{30}$  体系中, Al 含量为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右时, 非溶解态铝的溶解速率最快, 当 Al 含量增至  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上后, 聚硅酸对铝沉积行为影响逐渐变弱。

#### 参考文献:

- [1] 王红华. 饮用水中铝的来源危害与防治[J]. 微量元素与健康研究, 2006, 23(1): 60-63.
- [2] 杨忠莲, 高宝玉. 水体中残余铝的含量、组分、危害及控制研究进展[J]. 精细化工, 2013, 30(4): 412-419.
- [3] 刘文新, 梁兆坤, 汤鸿霄. 饮用水中铝的生物可给性研究进展[J]. 环境与健康杂志, 1997, 14(1): 46-48.
- [4] 曲志军. 饮用水中铝的控制措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [5] 崔福义, 胡明成, 张燕, 等. 我国部分城市饮用水中铝含量调查[J]. 中国给水排水, 2002, 18(1): 5-8.
- [6] 张玥, 石宝友, 宛云杰, 等. 给水管网管垢中铝的分布特征及其来源分析[J]. 给水排水, 2015, 41(9): 151-156.
- [7] 卢晨, 季敦生, 朱纯熙, 等. 水玻璃的基本组成及定量测定

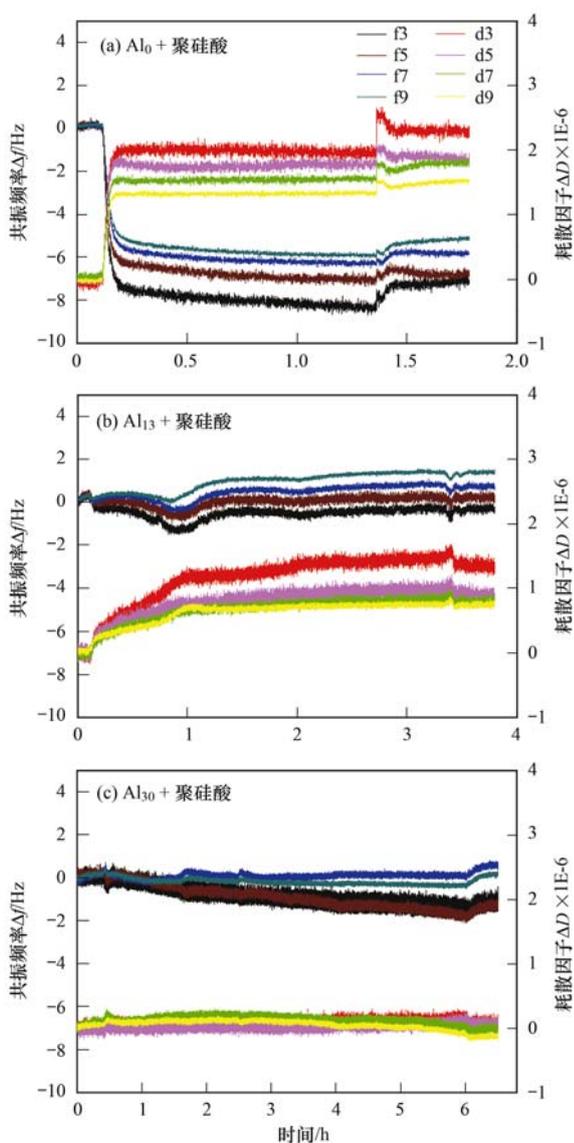


图 5 QCM-D 表征不同形态铝的沉积行为

Fig. 5 Performances of deposition behavior of polysilicic acid with different aluminum species onto gold monitored by QCM-D

- [J]. 上海交通大学学报, 1997, **31**(9): 86-89.
- [ 8 ] 秦蓁. 金属离子对聚硅酸絮凝效果的影响[J]. 工业水处理, 1996, **16**(3): 8-9.
- [ 9 ] 汤鸿霄. 无机高分子复合絮凝剂的研制趋向[J]. 中国给水排水, 1999, **15**(2): 1-4.
- [10] Iler R. Effect of adsorbed alumina on the solubility of amorphous silica in water[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1973, **43**(2): 399-408.
- [11] Xu H, Jiao R Y, Xiao F, *et al.* Effects of different coagulants in treatment of TiO<sub>2</sub>-humic acid (HA) water and the aggregate characterization in different coagulation conditions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, **446**: 213-223.
- [12] Duan S X, Xu H, Xiao F, *et al.* Effects of Al species on coagulation efficiency, residual Al and floc properties in surface water treatment[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, **459**: 14-21.
- [13] 王趁义, 张彩华, 毕树平, 等. Al-Ferron 逐时络合比色光度法测定聚合铝溶液中 Al<sub>a</sub>, Al<sub>b</sub> 和 Al<sub>c</sub> 三种铝形态的时间界限研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(2): 252-256.
- [14] Zhang Y, Shi B Y, Zhao Y Y, *et al.* Deposition behavior of residual aluminum in drinking water distribution system: effect of aluminum speciation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **42**: 142-151.
- [15] 王文东, 杨宏伟, 蒋晶, 等. 天然水中可溶性硅酸与铝盐作用机理探讨[J]. 化学学报, 2008, **66**(23): 2625-2630.
- [16] Pakalns P. Spectrophotometric determination of aluminium with chrome azurol s[J]. Analytica Chimica Acta, 1965, **32**: 57-63.
- [17] Richert L, Lavalle P, Vautier D, *et al.* Cell interactions with polyelectrolyte multilayer films[J]. Biomacromolecules, 2002, **3**(6): 1170-1178.
- [18] Isaacson C, Zhang W, Powell T, *et al.* Temporal changes in aqu/C<sub>60</sub> physical-chemical, deposition, and transport characteristics in aqueous systems[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(12): 5170-5177.
- [19] Tammelin T, Merta J, Johansson L S, *et al.* Viscoelastic properties of cationic starch adsorbed on quartz studied by QCM-D[J]. Langmuir, 2004, **20**(25): 10900-10909.
- [20] 王文东, 杨宏伟, 祝万鹏, 等. 给水系统中铝迁移转化研究进展[J]. 净水技术, 2007, **26**(4): 8-11.
- [21] 高宝玉, 李翠平, 岳钦艳, 等. 铝离子与聚硅酸的相互作用[J]. 环境化学, 1993, **12**(4): 268-273.
- [22] Rodahl M, Höök F, Fredriksson C, *et al.* Simultaneous frequency and dissipation factor QCM measurements of biomolecular adsorption and cell adhesion [J]. Faraday Discussions, 1997, **107**: 229-246.

## CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM <sub>2.5</sub> Under Air Heavy Pollution in Beijing .....	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes .....	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing .....	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province .....	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2014 APEC .....	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer in Hongshan District, Wuhan .....	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM <sub>2.5</sub> Based on <i>k</i> -means Analysis .....	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM <sub>2.5</sub> .....	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion .....	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles .....	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China .....	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China .....	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants .....	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River .....	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model .....	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region .....	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis .....	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause .....	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming .....	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake .....	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments .....	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water .....	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i> .....	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies .....	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process .....	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species .....	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China .....	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O <sub>3</sub> /UV .....	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose .....	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater .....	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow .....	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary .....	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater .....	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau .....	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge .....	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate .....	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX .....	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields .....	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO <sub>2</sub> Fixation Bacterial Communities and Their CO <sub>2</sub> Assimilation Contents .....	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System .....	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments .....	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil .....	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer .....	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels .....	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt .....	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes .....	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues .....	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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