

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬 (<i>Corbicula fluminea</i>) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化

周振¹, 胡大龙¹, 乔卫敏¹, 陈冠翰¹, 蒋玲燕², 李震², 麦穗海²

(1. 上海电力学院环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘要: 在对比聚合氯化铝(PAC)对浓缩脱水污泥水及其上清液除磷效果的基础上, 通过响应曲面法(RSM)分析了污泥水上清液 PAC 除磷过程中 Al/P 摩尔比、pH 和搅拌转速(MS)对除磷效果的单独效应和联合效应, 并探讨了 PAC 除磷动力学. 结果表明, PAC 直接对污泥水混凝除磷会恶化其沉降性能, 且除磷效率不高. RSM 优化得到的上清液除磷最优工艺条件为: Al/P 摩尔比为 2.49, pH 为 8.3, MS 为 398 r·min⁻¹, 除磷效率为 97.8%, 实验验证结果表明该优化操作模式行之有效. 动力学分析结果表明, PAC 对污泥水的除磷过程分为化学沉淀与絮凝体快速吸附除磷和二级动力学沉淀除磷两阶段.

关键词: 污泥水; 除磷; 聚合氯化铝; 响应面; 优化; 污水处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2249-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.029

Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride

ZHOU Zhen¹, HU Da-long¹, QIAO Wei-min¹, CHEN Guan-han¹, JIANG Ling-yan², LI Zhen², MAI Sui-hai²

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Chentou Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Based on the comparison of phosphorous removal in sludge water and its supernatant by polyaluminum chloride (PAC), separate and combined effects of Al/P mole ratio, pH and mixing speed (MS) on phosphorus removal by PAC for the supernatant of thickening and dewatering sludge water were analyzed by the response surface methodology (RSM), and kinetics of phosphorous removal by PAC was also investigated. The results showed that direct addition of PAC into sludge water deteriorated its settling characteristics, and suspended solids in the sludge water could decrease the phosphorus removal efficiency. The RSM analysis results demonstrated that the effect of individual operation parameter on phosphorus removal was followed as the order of Al/P > pH > MS, and the optimal process parameters with phosphorus removal efficiency of 97.8% were Al/P = 2.49, pH = 8.3 and MS 398 r·min⁻¹, respectively. The verification experiment showed that the RSM model was valid and effective. Kinetic analysis illustrated that phosphorus removal by PAC was divided into two stages, a chemical precipitation and rapid adsorption stage, followed by a chemical precipitation stage that conformed to the second-order kinetics.

Key words: sludge water; phosphorus removal; polyaluminum chloride (PAC); response surface methodology (RSM); optimization; wastewater treatment

磷是城市污水中主要的污染物之一, 含磷污水直接排放会造成水体污染, 是导致水体富营养化的重要原因^[1~4]. 污水除磷是防止水体富营养化的重要途径^[5~7]. 然而, 污水处理系统排放的剩余污泥在浓缩脱水过程中会重新释磷, 产生高含磷的污泥水. 目前, 城市污水处理厂一般采用将污泥水回流至进水口再处理的方法, 这既造成了磷的重复处理, 又可能导致出水中的磷难以达标排放^[8,9].

化学结晶法除磷具有效率高、工艺简单、运行可靠的优点, 在污水处理中得到了广泛应用^[10~12]. 化学除磷一般通过 Al³⁺、Fe³⁺、Ca²⁺ 或 Mg²⁺ 与 PO₄³⁻ 形成沉淀将其去除, 同时絮状沉淀又能吸附去除部分正磷^[13,14]. 化学除磷对于高含磷污水具有很好的处理效果. Trigger 等^[15] 研究了羟基磷灰石结晶去除厌氧上清液中磷的效果. 张萌等^[6,7] 以响应面

法分析了 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 除磷过程主要操作条件 Fe/P、pH 和快速搅拌转速对富磷污水除磷的单独效应和联合效应. 磷酸铵镁沉淀去除回收富磷污水中磷的研究也得到了广泛关注^[15~17]. 然而, 作为污水处理厂水量较大且磷浓度较高的浓缩脱水污泥水, 系统考察铝盐对其除磷效能及相关影响因素的研究却鲜有报道.

本研究在探讨聚合氯化铝(PAC)直接混凝沉淀对污泥水除磷效果和沉降性能影响的基础上, 利用 Box-Behnken 响应曲面法研究了 PAC 除磷工艺主要操作条件 Al/P 摩尔比(以下简称 Al/P 比)、pH 和搅

收稿日期: 2013-09-28; 修订日期: 2013-11-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063403); 上海市科委能力建设计划项目(12250500900)

作者简介: 周振(1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水处理与污泥减量技术, E-mail: zhouzhen@shiep.edu.cn

拌转速(MS)的交互作用影响,寻求最佳除磷工艺条件,并初步探讨了污泥水 PAC 除磷动力学,以期为污泥水除磷工艺的应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 浓缩脱水污泥水来源

实验所用污泥水取自上海市白龙港污水处理厂.该厂剩余污泥经重力浓缩后加入聚丙烯酰胺(PAM),进入离心浓缩机机械浓缩,降低含水率.浓缩后的污泥再投加一定量的 PAM,进入离心脱水机脱水至含水率低于 80%.实验所用污泥水为机械浓缩和脱水两个处理单元产生的污泥水混合液。

1.2 污泥水除磷实验

本研究采用 ZR4-6 混凝实验搅拌机(深圳市中润水工业技术发展有限公司)通过烧杯实验进行。

除磷模式对比实验:取不同污泥浓度的污泥水和自然沉降后的上清液各 1L,加入不同 Al/P 比的 PAC,以 200 r·min⁻¹ 搅拌 2 min,再以 60 r·min⁻¹ 搅拌 15 min,静置 30 min 后,取上清液测定正磷。

单因素除磷实验:每组取污泥水上清液 1L 加入烧杯中,调节不同 pH、Al/P 比和 MS. 以 200 r·min⁻¹ 搅拌 2 min,再以 60 r·min⁻¹ 搅拌 15 min,后静置 30 min,取上清液测定正磷。

多因子复合实验:PAC 除磷的主要影响因子包括 Al/P 比、pH 和 MS. 根据单因素实验结果,确定各工艺条件最佳水平,采用 Box-Behnken 模型设计。

1.3 分析方法

化学需氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)、正磷、总磷(TP)、总氮(TN)和悬浮固体(SS)均按国家标准法测定^[18]. 溶解性 COD(SCOD)和溶解性总磷(TP_s)为水样经 0.45 μm 滤膜过滤后的 COD 和 TP。

1.4 铝盐除磷的反应动力学

假定 PAC 除磷按照式(1)反应进行。



设 Al³⁺ 和正磷起始浓度为 a 和 b (mmol·L⁻¹),时刻 t 时反应消耗浓度为 x (mmol·L⁻¹),假定反应速率常数为 k,则反应(1)的反应速率为:

$$\text{d}x/\text{d}t = k(a - x)(b - x) \tag{2}$$

对式(2)按照边界条件(0,0)积分,得:

$$\ln\left(\frac{a - x}{b - x}\right) = k_{\text{obs}}t \tag{3}$$

其中,表观速率常数:

$$k_{\text{obs}} = (a - b)k \tag{4}$$

2 结果与讨论

2.1 浓缩脱水污泥水的水质特性分析

白龙港厂浓缩脱水污泥水水质如表 1 所示.该污泥水水质波动较大,SS、COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 浓度高.污泥在机械浓缩和高速离心脱水下,间隙水被挤出,部分胞外聚合物溶出,同时在浓缩脱水厌氧环境下污泥中磷又重新释放到污泥水中,所以污泥水含磷量很高.由表 1 数据结合污泥水水量 5 000 m³·d⁻¹ 计算,如果回流到 200 万 m³·d⁻¹ 的进水(TP 为 3.5 mg·L⁻¹)中,则 TP 负荷将增加 14.6%。

表 1 浓缩脱水污泥水水质特性表/mg·L⁻¹

Table 1 Characteristics of thickening and dewatering sludge water/mg·L⁻¹

指标	COD	SCOD	TN	NH ₄ ⁺ -N
浓度	3 772 ± 2 298	359.7 ± 44.6	357.9 ± 117.5	272.1 ± 86.9
指标	TP	TP _s	正磷	SS
浓度	204.1 ± 45.1	101.6 ± 26.9	94.6 ± 20.3	2 706 ± 1 720

2.2 污泥水除磷模式对比

Al₁₃(OH)₃₄⁵⁺ 是铝盐混凝的主要作用成分^[19,20],但在 pH>7 的污泥水中加入 PAC, Al³⁺ 水解主要产物为 AlO₂⁻^[20],无法提供正离子进入胶体扩散层甚至吸附层,难以降低体系 ζ 电位,同时 AlO₂⁻ 与污水中带负电的胶体相互排斥,无法凝聚,由此形成的絮体碎小,沉降速率慢. PAC 投加量越多,AlO₂⁻ 浓度越多,与带负电的胶体的斥力越大,沉降速率越慢,SV₃₀ 越大.因此,加入 PAC 不仅不能改善污泥水沉降性能,而且使污泥水沉降恶化^[21]. 当 Al/P 比为 0.52 和 1.05 时,污泥水 SV₃₀ 分别是原液的 1.57 和 2.17 倍。

图 1 为不同 SS 浓度下 Al/P 比对正磷去除率影响的对比.从中可知,同一污泥水中 Al/P 比越大,正磷去除率越高;SS 越低,PAC 除磷效果越好.当 Al/P 比为 1.40 时,污泥水 SS 为 9.22、3.75 和 0 g·L⁻¹ 对应的正磷去除率分别为 48.2%、69.2% 和 74.1%.由于污泥水中颗粒物对 Al³⁺ 的消耗,造成用于除磷的 Al³⁺ 比例降低,除磷效率下降。

2.3 污泥水上清液除磷单因素实验研究

由污泥水除磷模式对比知,浓缩脱水污泥水自身沉降性能较好(SV₃₀ = 25.8%),投加 PAC 反而会恶化其沉降性能,且除磷效率不高,故以下除磷因素

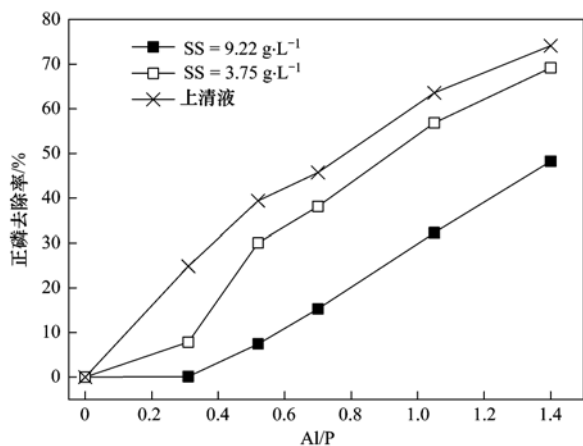


图1 Al/P 比对污泥水 PAC 除磷效率的影响

Fig. 1 Effects of Al/P ratio on phosphorus removal of sludge water by PAC

研究对象为污泥水上清液。

2.3.1 Al/P 比的影响

Al^{3+} 和正磷以一定的计量关系进行沉淀反应, Al/P 比的变化会影响到反应(1)的化学移动,进而影响正磷去除率。不同 Al/P 比下污泥水上清液正磷去除率如图 2 所示。随 Al/P 比增大,正磷去除率增大。Al/P 比由 0.31 上升至 1.92 时,正磷去除率增幅达 61.3%; 继续升至 2.97,则仅提高 11.0%。若污泥水直接排放,则宜选取较高的 Al/P 比; 若污泥水回流并兼顾经济性,则 Al/P 比为 1.92 为宜。

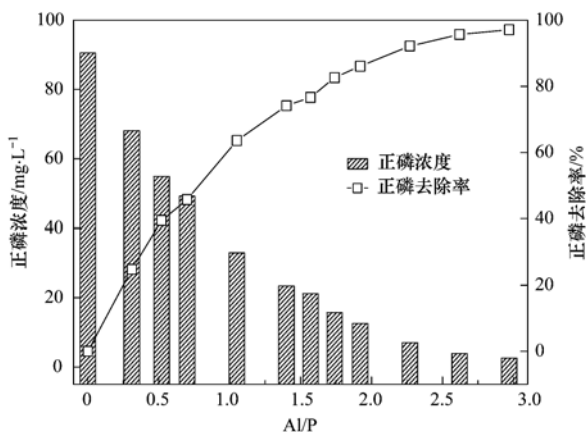


图2 Al/P 比对污泥水 PAC 除磷效率的影响

Fig. 2 Effects of Al/P ratio on phosphorus removal of sludge water by PAC

2.3.2 pH 的影响

pH 影响 PAC 水解产物的形态。pH 为 5.0 ~ 7.0 时,铝盐水解的主要产物为 AlO_2^- 和 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$,但由于此时溶解态铝浓度很小,铝盐将大量以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 形式沉淀; pH > 7 时, PAC 水解主要产物是 AlO_2^- [22]。同时, pH 也会影响 AlPO_4 沉淀的溶解

度, AlPO_4 最小溶解度对应的 pH 为 6.0 ~ 7.0, 若低于该 pH, 生成的 AlPO_4 重新溶解 [23]。

为了确定合适的 pH 范围, 分析了 pH 为 5.0 ~ 11.0 时污泥水上清液 PAC 除磷效果, 如图 3 所示。当 pH < 9.0 时, 随着 pH 升高, 正磷去除率升高; 当 pH > 9.0 时, 进一步提高 pH, 正磷去除率降低, 但降低幅度很小。在 pH < 6.0 和 pH > 10.0 时, pH 对 PAC 混凝效果和磷酸铝的溶解度影响不大。因此, pH 为 9.0 时 PAC 对上清液的除磷效率最高, 这可能与 PAC 在弱碱性条件下混凝效果最佳有关 [24]。

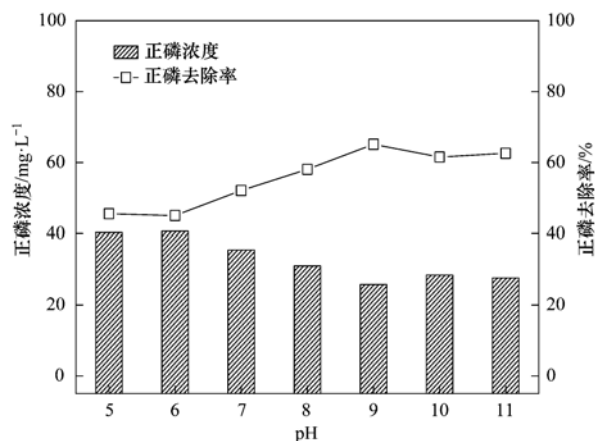


图3 pH 对污泥水 PAC 除磷效率的影响

Fig. 3 Effects of pH on phosphorus removal of sludge water by PAC

2.3.3 搅拌转速的影响

合适的 MS 可使 PAC 迅速扩散到上清液中, 温度场和浓度场更均匀, 促使 Al^{3+} 与 PO_4^{3-} 接触形成沉淀除磷, 但是 MS 过大会打碎絮体, 阻碍沉淀形成, 降低正磷去除率。为确定合适的 MS, 分析了 50 ~ 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内污泥水上清液的 PAC 除磷效果, 如图 4 所示。随着 MS 增加, 正磷去除率略有升

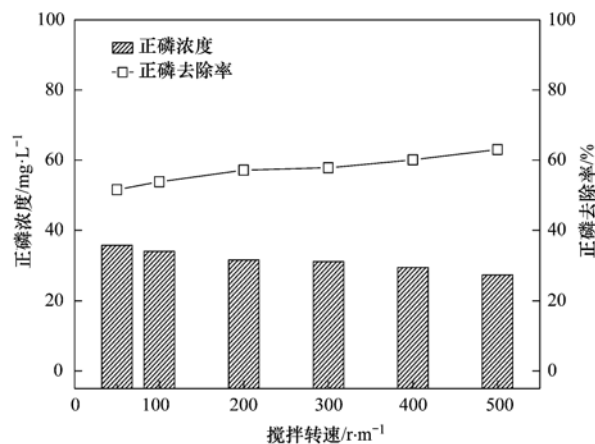


图4 搅拌转速 (MS) 对污泥水 PAC 除磷效率的影响

Fig. 4 Effects of MS on phosphorus removal of sludge water by PAC

高,但影响变化不大,去除率极差仅为 11.5%.

2.4 响应面实验优化污泥水上清液除磷

由单因素实验结果确定 Box-Behnken 模型的优化水平及其编码如表 2 所示. 采用 Box-Behnken 模型对三因素三水平实验的结果进行二次多项拟合,可得正磷去除率($Y\%$)的方程[式(5)]. 模型的方差分析见表 3.

$$Y\% = 75.88 + 38.85A + 1.98B + 1.26C + 10.85AB - 2.74AC + 0.71BC - 33.35A^2 - 6.76B^2 + 9.07C^2 \quad (5)$$

所拟合的全变量二次回归方程回归系数 R^2 为 0.94,表明预测值与实测值之间的相关性较好;修

正后 R^2 为 0.86,表明响应值的 86% 是由于所选变量引起,可以利用该回归方程确定最佳去除工艺.

表 2 Box-Behnken 实验因素水平及其编码

Table 2 Selected variables and levels for the Box-Behnken test		水平		
实验因素及其编码		-1	0	1
Al/P	A	0	1.5	3
pH	B	5	7.5	10
MS/ $r \cdot \min^{-1}$	C	100	250	400

由表 3 可知,本实验所选模型不同处理间差异显著(模型的 $P < 0.01$),说明回归方程描述各因子与响应值之间的关系时,其应变量与全体自变量之间的线性关系是显著的,即这种实验方法是可靠的.

表 3 回归方程模型方差分析及其系数的显著性检验

Table 3 Analysis of variance for the fitted quadratic model and significance test of its regression coefficients						
项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	17 810.1	9	1 978.9	11.8	0.001 9	$P < 0.01$
A	12 075.4	1	12 075.4	71.9	$< 0.000 1$	$P < 0.01$
B	31.5	1	31.5	0.2	0.678 2	
C	12.8	1	12.8	0.1	0.790 5	
AB	471.1	1	471.1	2.8	0.138 0	
AC	30.0	1	30.0	0.2	0.685 2	
BC	2.0	1	2.0	0.01	0.915 3	
A^2	4 683.0	1	4 683.0	27.9	0.001 1	$P < 0.01$
B^2	192.4	1	192.4	1.1	0.320 1	
C^2	346.2	1	346.2	2.1	0.194 3	
残差	1 176.4	7	168.1			
纯误差	49.8	4	12.5			
总离差	18 986.4	16				

根据多元二次回归方程,AC 交互作用项系数的符号为负号,这说明 Al/P 比和 MS 之间为拮抗作用;各个系数绝对值大小可判断 3 个因素对正磷去除率的影响顺序为:Al/P 比 $>$ pH $>$ MS. 由表 3 模型中的回归系数进行显著性检验可知,A 对正磷去除率的线性效应极显著,B 和 C 对正磷去除率的线性效应不显著;A、B、C 两两交互影响均不显著;因素 A^2 的曲面效应极显著, B^2 和 C^2 不显著.

利用 Matlab 7.0 软件作出了模型方程的等高线图(图 5 ~ 图 7). 图面颜色越深,说明结果越显著^[11,12],即除磷效果越好.

由图 5 可见,在 MS $250 r \cdot \min^{-1}$ 且 pH 一定时,随 Al/P 比的增加,正磷去除率增加;Al/P 比不变时,随 pH 的增加,正磷去除率呈先升后降的趋势. 这与单因素实验结果相吻合. 正磷去除率的变化速率显示 Al/P 比主效应大于 pH,与统计结果相符. 在图 5 中等高线右上侧区域,即 Al/P 比 2.0 ~ 3.0、pH 8.0 ~ 10.0 时,图形颜色较深,表明污泥水正磷

去除效果较好.

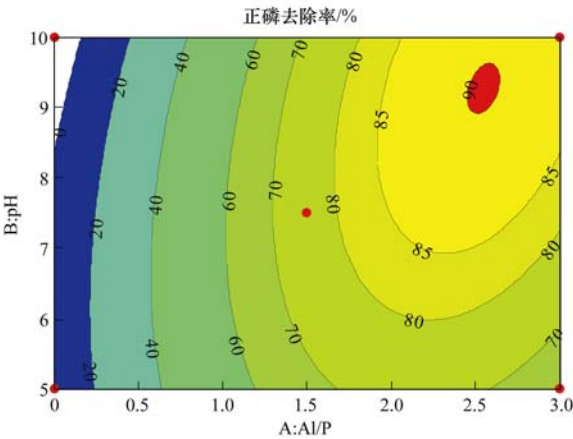


图 5 Al/P 比-pH 响应等高线图 (AB)

Fig. 5 Contour lines for mutual interaction of Al/P mole ratio and pH on phosphorus removal (AB)

由图 6 可见,在 pH 为 7.5, Al/P 比一定时,随 MS 增加,正磷去除率先减小后增大;转速一定时,正磷去除率随 Al/P 比增加先升后降. 正磷去除率的

变化速率显示 Al/P 比主效应大于 MS,与统计结果相符. 在图 6 中等高线右上、下侧区域,即 Al/P 比 2.0 ~ 3.0, MS 在 100 ~ 150 r·min⁻¹ 和 350 ~ 400 r·min⁻¹时,图形颜色较深,表明污泥水正磷去除效果较好.

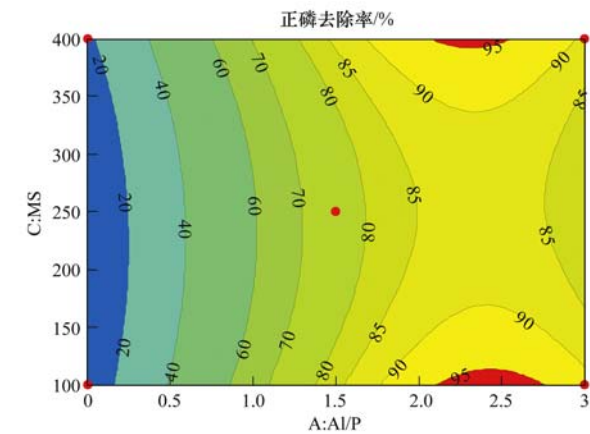


图 6 Al/P 比-搅拌转速 (MS) 响应等高线图 (AC)

Fig. 6 Contour lines for mutual interaction of Al/P mole ratio and MS on phosphorus removal (AC)

由图 7 可见,在 Al/P 比为 1.5,pH 一定时,随 MS 增加,正磷去除率先减小后增大. MS 一定时,随 pH 增加,正磷去除率先升后降. 正磷去除率的变化速率显示 pH 主效应大于 MS,但正磷去除率的变化速率都很小,说明 pH-MS 复合作用对正磷去除率影响较小. 在图 7 的等高线中上、下侧区域,即 pH 7.0 ~ 9.0, MS 在 100 ~ 150 r·min⁻¹ 和 350 ~ 400 r·min⁻¹时,图形颜色较深,表明污泥水正磷去除效果较好.

综合响应面分析,可得污泥水除磷工艺条件的影响大小为 Al/P 比 > pH > MS; 交互作用效应大小为 Al/P 比-pH > Al/P 比-MS > pH-MS. 由于 pH 过高或过低会降低正磷去除率,工艺优化中应注意控制 pH.

2.5 污泥水 PAC 除磷的优化模式及其验证

2.5.1 “优先/联合”优化模式

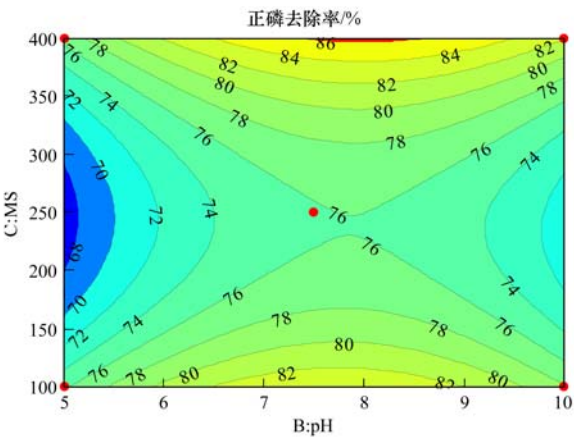


图 7 pH-搅拌转速 (MS) 相应曲面图 (BC)

Fig. 7 Contour lines for mutual interaction of pH and MS on phosphorus removal (BC)

通过单因素实验和 Box-Behnken 模型的响应曲面法分析,可以了解各操作条件对除磷效率的贡献及其交互作用. 因此,污泥水 PAC 除磷工艺可采用“优先/联合”优化模式加以控制. 单个操作条件对除磷效率贡献大小不同,实际操作中应区别对待,优先控制贡献大的操作条件,即优先控制. 由响应曲面分析可知,即使某一操作条件处于最优水平,污泥水 PAC 除磷效率也并不一定高,单个操作条件并不具备主导 PAC 除磷过程的能力. 要优化除磷效果,需要考虑各操作条件的交互效应,即联合控制^[6].

根据“优先/联合”优化模式,结合 Box-Behnken 模型分析结果,优化的操作参数为 Al/P 比 2.49、pH 8.3、MS 398 r·min⁻¹,该条件下正磷去除率为 97.7%. 在 Al/P 比 2.43 ~ 2.69、pH 8.3 ~ 9.5、MS 100 ~ 388 r·min⁻¹ 的条件下,正磷去除率均在 97.0% 以上,吨水除磷药剂成本约为 1.12 元(以 PAC 900 元·t⁻¹计).

2.5.2 “优先/联合”优化模式的验证

对“优先/联合”优化模式的实验验证结果见表 4. 实验结果与预测结果间误差较小 (<5%),说明模型具有高度的可信性.

表 4 “优先/联合”优化模式的验证结果

Table 4 Verification results for “priority/combination” model

工况	操作条件			模型模拟结果 /%	实验结果 /%	误差 /%
	Al/P	pH	MS/r·min ⁻¹			
1	2.49	8.3	398	97.7	97.8	0.7
2	1.31	7	250	70.2	70.3	0.2
3	1.31	5	250	63.2	65.9	4.3

2.6 污泥水中 PAC 除磷动力学研究

根据式(3)做表 4 中工况 2 和 3 的动力学曲线,

如图 8 所示. 从中可知,在反应初始阶段,正磷去除很快,这是因为 PAC 加入污泥水中后,化学沉淀和

混凝絮体的快速吸附造成正磷迅速降低^[14,25,26]. 但絮体吸附很快饱和,工况 2 和 3 分别在 2~4 min 和 4~6 min 吸附饱和,此后主要通过式(1)的沉淀反应去除正磷;对后一阶段用式(4)拟合,拟合结果如表 5 所示. 从中可知,拟合得到的可决系数 R^2 均在 0.90 以上,这说明 Al^{3+} 与正磷的沉淀反应符合二级动力学. 工况 2 和 3 的二级动力学常数 k_{obs} 分别为 3.89 d^{-1} 和 3.46 d^{-1} ,工况 2 的 pH 在 PAC 混凝最佳 pH 范围(6.5~7.6)内,而工况 3 的 pH 为 5.0,生成的磷酸铝又部分溶解. 因此,工况 2 除磷效率更高,且 k_{obs} 略高于工况 3.

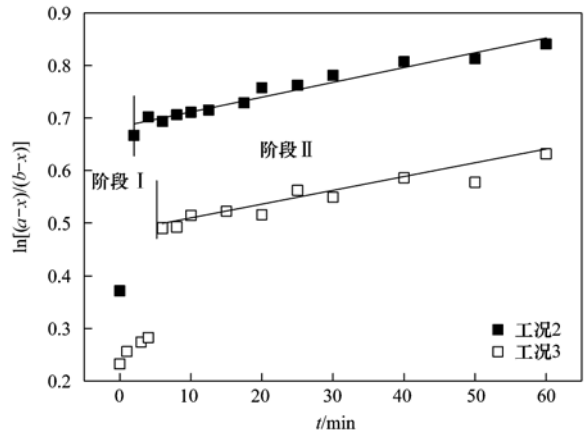


图 8 污泥水 PAC 除磷的动力学曲线
Fig. 8 Kinetics of phosphorus removal of sludge water supernatant by PAC

表 5 污泥水 PAC 除磷的二级动力学拟合
Table 5 Fittings of the second-order kinetics for phosphorus removal of sludge water supernatant by PAC

工况	时间/min	动力学方程	R^2
2	4~60	$y=0.0027t+0.6872$	0.97
3	6~60	$y=0.0024t+0.4821$	0.92

3 结论

(1) 污泥水直接投加 PAC 混凝除磷,不仅会恶化其沉降性能,也会降低除磷效率.
(2) 随着 Al/P 比的增加,污泥水的正磷去除率增加;随着 pH 升高,正磷去除率先增加后下降,最佳 pH 约为 9.0;MS 对正磷的去除率影响不大.
(3) 采用响应曲面法 Box-Behnken 模型对 PAC 除磷工艺的操作条件进行优化,确定各操作条件对废水除磷效率的贡献大小为 Al/P 比>pH>MS.
(4) 污泥水 PAC 除磷的最优操作参数为:Al/P 比 2.49、pH 8.3、MS $398\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. 经实验验证,此条件下正磷去除率为 97.8%,与模型预测结果一致.

(5) 由于絮凝体的吸附和沉淀反应,污泥水中加入 PAC 后正磷浓度会迅速下降;在快速吸附饱和后,铝盐除磷过程符合二级动力学.

参考文献:

[1] 孟文娜,谢杰,吴德意,等. 活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 231-236.
[2] Zhang Q R, Du Q, Jiao T F, *et al.* Selective removal of phosphate in waters using a novel of cation adsorbent: Zirconium phosphate (ZrP) behavior and mechanism [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **221**: 315-321.
[3] 李婷,董文艺,王宏杰,等. $Fe(II)/O_2$ 除磷的影响因素及反应动力学[J]. 化工学报, 2013, **64**(5): 1840-1846.
[4] 郝晓地,戴吉,胡沉胜,等. C/P 比与磷回收对生物营养物去除系统影响的试验研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3098-3103.
[5] Lee S H, Yoo B H, Lim S J, *et al.* Development and validation of an equilibrium model for struvite formation with calcium co-precipitation [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, **372**(1): 129-137.
[6] 张萌,邱琳,于晓晴,等. 亚铁盐除磷工艺的优化研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(7): 1223-1227.
[7] 张萌,于晓晴,邱琳,等. 响应曲面法优化铁盐除磷工艺[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, **38**(5): 623-628.
[8] 于莉芳,刘小英,王圣伟,等. SBR 工艺处理城市污水厂污泥水的研究[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(17): 6-10.
[9] 刘范嘉,聂英进,张晓丹,等. MBR 工艺处理城镇污水处理厂污泥水中试研究[J]. 给水排水, 2010, **36**(2): 42-45.
[10] Jordaan E M, Ackerman J, Cicek N. Phosphorus removal from anaerobically digested swine wastewater through struvite precipitation [J]. Water Science and Technology, 2010, **61**(12): 3228-3234.
[11] Banu J R, Do K U, Yeom I T. Effect of ferrous sulphate on nitrification during simultaneous phosphorus removal from domestic wastewater using a laboratory scale anoxic/oxic reactor [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, **24**(12): 2981-2986.
[12] Wang J, Burken J G, Zhang X, *et al.* Engineered struvite precipitation: impacts of component-ion molar ratios and pH[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, **131**(10): 1433-1440.
[13] Hutnik N, Kozik A, Mazieniczuk A, *et al.* Phosphates (V) recovery from phosphorus mineral fertilizers industry wastewater by continuous struvite reaction crystallization process [J]. Water Research, 2013, **47**(11): 3635-3643.
[14] 孟顺龙,裴丽萍,陈家长,等. 污水化学沉淀法除磷研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(35): 264-268.
[15] Triger A, Pic J S, Cabassud C, *et al.* Determination of struvite crystallization mechanisms in urine using turbidity measurement [J]. Water Research, 2012, **46**(18): 6084-6094.
[16] 李秋成,张涛,丁丽丽,等. 响应面法优化 MAP 沉淀去除回收尿液中磷的研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 129-

- 136.
- [17] Zhang D M, Chen Y X, Jilani G, *et al.* Optimization of struvite crystallization protocol for pretreating the swine wastewater and its impact on subsequent anaerobic biodegradation of pollutants [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **116**: 386-395.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] 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.
- [20] Lin J L, Chin C J M, Huang C P, *et al.* Coagulation behavior of Al_{13} aggregates [J]. *Water Research*, 2008, **42** (16): 4281-4290.
- [21] 刘范嘉, 付华平, 刘建阔, 等. 混凝沉淀法处理城镇污水厂污泥水的研究[J]. *中国给水排水*, 2011, **27** (5): 96-98.
- [22] 阮复昌, 莫炳禄, 徐国想, 等. 铝系净水剂混凝过程的理论分析与计算[J]. *化学反应工程与工艺*, 1997, **13** (4): 413-418.
- [23] 刘宁, 陈小光, 崔彦召, 等. 化学除磷工艺研究进展[J]. *化工进展*, 2012, **31** (7): 1597-1603.
- [24] 吴珍, 张盼月, 曾光明, 等. 不同铝形态去除水中腐殖酸的混凝特性[J]. *环境科学*, 2008, **29** (7): 1903-1907.
- [25] Boisvert J P, To T C, Berrak A, *et al.* Phosphate adsorption in flocculation processes of aluminium sulphate and polyaluminium-silicate-sulphate [J]. *Water Research*, 1997, **31** (8): 1939-1946.
- [26] 王昌辉, 裴元生. 给水处理厂废弃铁铝泥对正磷酸盐的吸附特征[J]. *环境科学*, 2011, **32** (8): 2371-2377.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行