

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,张洪助(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)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO_4^{3-} 的脱除性能

邢坤¹, 王海增²

(1. 淄博市环境保护局, 淄博 255003; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 利用大型工业设备制备出性能稳定的粉末层状氢氧化镁铝(500 kg·批⁻¹, 记为 Mg-Al LDH), 采用沉积法将 Mg-Al LDH 进行改性与成型, 研究了改性与成型层状氢氧化镁铝(记为 MG Mg-Al CLDH)对水溶液、废水、不同地带海水中 PO_4^{3-} 的动态吸附脱除及再生性能. 结果表明, MG Mg-Al CLDH 能够有效脱除不同水体中的 PO_4^{3-} , 满足污水综合排放一级标准或海水水质一级标准. MG Mg-Al CLDH 对 PO_4^{3-} 脱除主要是通过离子交换和“结构记忆”效应共同实现的. MG Mg-Al CLDH 对水溶液中 PO_4^{3-} 的穿透吸附量是未改性时的 6 倍以上, 再生率为 126.24%, PO_4^{3-} 的穿透曲线受固定床高度、流量、溶液初始浓度、溶液初始 pH 值的影响, 液膜扩散是吸附过程的主控步骤. 当溶液初始浓度低至 4.61 mg·L⁻¹ 时, MG Mg-Al CLDH 能将某污水处理厂二级出水中 PO_4^{3-} 有效脱除, 满足污水综合排放一级标准. 当 PO_4^{3-} 浓度低至 0.38 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, MG Mg-Al CLDH 仍能将其从海水中有效脱除, 达到海水水质一级标准, 为解决 Mg-Al LDH 在实际应用中存在粉末易堵塞床体、无法实现固液分离和再生的问题及水体中磷的脱除提供了一条新型可行之路.

关键词: 改性与成型; 层状氢氧化镁铝; PO_4^{3-} ; 水溶液; 废水; 海水; 脱除

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1611-06

Removal of PO_4^{3-} from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide

XING Kun¹, WANG Hai-zeng²

(1. Environmental Protection Association of Zibo, Zibo 255003, China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Powder layered double hydroxide of Mg-Al LDH were prepared by hydrothermal technology with 500 kg·batch⁻¹, modified and granulated (MG Mg-Al CLDH) by deposition method. After the modification and granulation, the fixed bed can not be accumulated and clogged by the adsorbents. The PO_4^{3-} is removed from aqueous solution, wastewater and seawater by MG Mg-Al CLDH with column experiments. It shows that MG Mg-Al CLDH is an effective adsorbent. After removal, the water quality can satisfy with the first degree of integrated wastewater discharge or seawater standards. The mechanism of removal PO_4^{3-} is ion exchange and ‘memory effect’. The breakthrough adsorption capacity of PO_4^{3-} from solution is 13.49 mg·g⁻¹, more than 6 times higher than that by Mg-Al LDH without modification. The exhausted MG Mg-Al CLDH can be desorbed with 0.1 mol·L⁻¹ NaOH and 3 mol·L⁻¹ NaCl and regenerated with 25% MgCl₂. The regeneration rate is 126.24%. The breakthrough curves are influenced by bed depth, flow rate, initial concentration and initial pH. The adsorption processes are controlled by film diffusion. When the initial concentration is as low as 0.38 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} can be removed from seawater to satisfy with the first degree of seawater quality. So this work is very useful for the practical application of Mg-Al LDH and the removal of phosphorus.

Key words: modification and granulation; magnesium and aluminium layered double hydroxide; PO_4^{3-} ; water solution; wastewater; seawater; removal

层状氢氧化镁铝是一种阴离子型层状化合物, 在吸附和离子交换^[1~6]方面占有十分重要的地位. 但目前对层状氢氧化镁铝的研究和应用主要局限于粉末形态^[1~8], 存在固体悬浮物易堵塞床体、反应后难于分离和无法实现再生等不足, 故层状氢氧化镁铝在实际应用中受到较大限制. 因此, 要实现层状氢氧化镁铝在吸附和离子交换方面的实际应用, 必须将层状氢氧化镁铝进行有效成型与改性.

过量磷不仅会导致水体富营养化, 而且会污染地下水源, 从而对人体健康造成严重危害. 目前, 我国城市污水处理厂 80% 以上以絮凝沉淀和生物法为主, 对磷等无机污染物的处理效果不佳, 要想达到

收稿日期: 2012-06-14; 修订日期: 2012-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(20477041); 国家科技支撑计划项目(2006BAB03A11-1)

作者简介: 邢坤(1981~), 女, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为水污染治理技术, E-mail: kunxing125@163.com

水质排放标准,必须经过三级处理.近几年来,青岛海水由于富营养化每到夏季就会出现浒苔.因此,有效控制和降低废水或海水中磷已成为新课题.

本研究利用大型工业设备制备出性能稳定的粉末层状氢氧化镁铝(记为 Mg-Al LDH),采用沉积法将 Mg-Al LDH 进行改性及成型,分析了改性与成型层状氢氧化镁铝(记为 MG Mg-Al CLDH)对水溶液、废水、海水中 PO_4^{3-} 的动态吸附脱除及再生性能.

1 材料与方 法

1.1 试剂与仪器

试剂: Na_3PO_4 、钼酸铵、酒石酸锶钾、抗坏血酸、硫酸、磷酸二氢钾、盐酸、氢氧化钠、 $\text{Mg}(\text{Ac})_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 等. 以上试剂均为分析纯,生产厂家为 国药集团化学试剂有限公司.

仪器: D8ADVANCE XRD (Bruker); 722S 可见分光光度计(上海精密科学有限公司); pHS-3C 酸度计(上海伟业仪器厂); TBL-2 催化剂成型机(天大北洋化工实验设备有限公司); BT02-DG-4 蠕动泵(天津市协达伟业电子有限公司); DZF 型真空干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); SX2-4-10 型电阻炉(山东省龙口市电炉总厂); SHZ-III 型循环水真空泵(上海亚荣生化仪器厂); 电子天平(上海精密科学仪器有限公司).

1.2 Mg-Al LDH 的制备及其改性与成型

1.2.1 Mg-Al LDH 的制备^[9,10]

在水热条件下采用部分改造的硅胶生产设备制得 Mg-Al LDH ($500 \text{ kg} \cdot \text{批}^{-1}$),性能非常稳定,其理论分子式为 $\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}(\text{CO}_3) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

1.2.2 Mg-Al LDH 的改性与成型^[11]

将质量比分别为 5% ~ 99%、0 ~ 10% 的 Mg-Al LDH 和黏结剂加入到 1% ~ 95% 的镁盐溶液中,使固液比为 1:5 ~ 1:15,用 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 调节体系 pH 值达到 9 ~ 11,反应 15 ~ 180 min 后,将上述混合物离心分离,烘干至手捏能成团,用催化剂成型机制成直径为 2 mm 的圆柱形吸附剂,在 110℃ 下烘干. 然后在 350 ~ 700℃ 下焙烧 1 ~ 4 h,冷却至室温后装入密封袋中保存待用.

1.3 比表面积测定

采用 ASAP 2020 全自动比表面分析仪,在温度 77.35 K 和相对压力 (p/p_0) 为 10^{-6} ~ 1 的范围内,测定样品对氮的吸附体积,绘制吸附/脱附等温线. 利用 BET 方程计算样品比表面积.

1.4 零电荷点 (PZC)^[12,13] 测定

称取 NaCl 配成 50 mL 溶液,使其浓度为 $0.001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,作为电解质溶液. 用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 或 NaOH 调节溶液的初始 pH 值,加入 0.1 g 样品,待反应平衡后,测反应后 pH,以反应前后 pH 值的变化对初始 pH 作图,得到样品的 PZC.

1.5 X 射线粉末衍射 (XRD)

用 D8 ADVANCE 型多晶粉末 X 射线衍射仪测定层状氢氧化镁铝改性前后及改性与成型层状氢氧化镁铝吸附 PO_4^{3-} 后和再生后的结构变化. 采用电压 40 kV,电流 45 mA,Cu 靶 K_α 辐射,扫描速度为 $6^\circ \cdot \text{min}^{-1}$,扫描角度 $8^\circ \sim 70^\circ$,扫描步长为 0.2° .

1.6 MG Mg-Al CLDH 对不同水体中 PO_4^{3-} 的脱除性能

本研究采用固定床动态吸附脱除 PO_4^{3-} ,吸附柱高为 68 cm,内径为 1.1 cm. 将成型层状氢氧化镁铝(记为 G Mg-Al CLDH,Mg-Al LDH 未经改性直接成型,然后在 450℃ 下焙烧 3 h)和 MG Mg-Al CLDH 按径高比为 1.1:10 分别装入吸附柱中,两端用玻璃丝固定,使不同水体自上而下通过吸附柱. 根据污水综合排放一级标准^[14]或海水水质一级标准^[15],将脱除后水溶液中磷的浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,作为磷的允许排放浓度,即穿透点浓度,由方程^[16]求得穿透吸附量. 采用磷钼蓝分光光度法^[17]测定 PO_4^{3-} 的残留浓度,计算 MG Mg-Al CLDH 对 PO_4^{3-} 的脱除率 r . 每组实验做 3 个平行样,取平均值.

$$q_b = \frac{Qc_0 \int_{t=0}^t r\% \cdot dt}{m}$$

式中, r 为脱除率,% ; m 为吸附剂质量,g ; Q 为流量, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

$$\text{脱除率 } r = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \times 100\%$$

式中, c_0 为溶液中 P 的初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_e 为吸附后溶液中 P 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; q_b 为穿透吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

1.7 MG Mg-Al CLDH 的解吸再生

将吸附饱和 ($c_t/c_0 = 0.7$) 后的 MG Mg-Al CLDH,用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 和 $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液进行解吸,用去离子水洗至流出液为中性,用 300 mL 质量浓度为 25% 的 MgCl_2 溶液进行再生,用去离子水洗至无氯离子检出,然后将吸附剂再次用于吸附. 再生效率可用 $\text{RE} = (A_t/A_0) \times$

100% 来计算, 式中 A_t 和 A_0 分别表示再生后和再生前的吸附容量.

2 结果与讨论

2.1 材料表征

2.1.1 比表面积

Mg-Al LDH 未经改性直接成型(记为 G Mg-Al CLDH)时比表面积为 $166.79 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 经改性与成型后比表面积为 $233.34 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 比直接成型时增加了 40%.

2.1.2 零电荷点(PZC)

MG Mg-Al CLDH 和 G Mg-Al CLDH 的零电荷点如图 1 所示, 分别为 10.6、11.7, 由此可见, Mg-Al LDH 经过改性与成型后, PZC 减小.

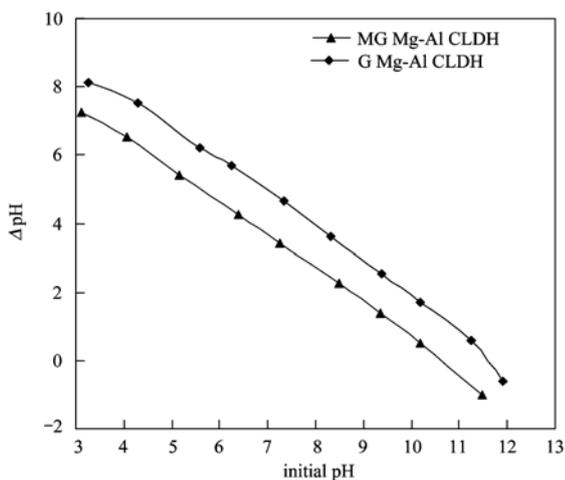


图 1 样品的零电荷点
Fig. 1 PZC of samples

2.1.3 XRD 表征

Mg-Al LDH、MG Mg-Al CLDH 及其吸附 PO_4^{3-} 后和再生后的 XRD 结果如图 2 所示. 从中看出, Mg-Al LDH 的主要衍射峰尖而窄, 峰形对称, 基线平稳, 说明 Mg-Al LDH 产物纯度与结晶度高, 低角度的 d_{003} (0.775 nm) 和 d_{006} (0.387 nm) 晶面衍射峰表现出明显的层状氢氧化镁铝的特征衍射峰. Mg-Al LDH 经改性与成型后, 层状结构部分塌陷, 并在 2θ 为 43° 处表现出金属混合氧化物的峰, d_{003} 峰值大大缩小, 为 0.696 nm. MG Mg-Al CLDH 吸附 PO_4^{3-} 后, 表征层状结构的 d_{003} (0.792 nm) 和 d_{006} 特征衍射峰重新出现, 金属混合氧化物的衍射峰消失, 证明 MG Mg-Al CLDH 是通过离子交换和“结构记忆”效应^[18]来共同实现对 PO_4^{3-} 的吸附脱除. MG Mg-Al CLDH 吸附饱和后, 可用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 和

$3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 解吸和用质量分数为 25% 的 MgCl_2 再生, 再生后层间阴离子主要为 Cl^- , 2θ 向低角度移动, 层间距增大到 0.803 nm, 更容易与 PO_4^{3-} 发生离子交换, 所以再生率 $> 100\%$.

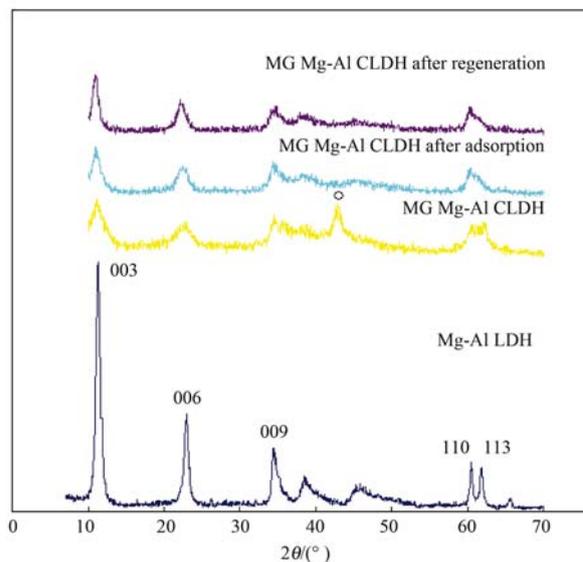


图 2 Mg-Al LDH 改性前、后, MG Mg-Al CLDH 吸附后和再生后的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD patterns of Mg-Al LDH, MG Mg-Al CLDH before and after adsorption, after regeneration

2.2 MG Mg-Al CLDH 对水溶液中 PO_4^{3-} 的脱除

2.2.1 固定床高度对穿透曲线的影响

当溶液初始浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (文中均以 P 计), 流量为 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 固定床高度对穿透曲线的影响如图 3 所示. 从中可知, 床层高度不同, 但穿透曲线的形状和斜率基本保持不变, 说明传质扩散系数和传质区不因床层增大而改变, 颗粒内扩散不是吸附过程的主控步骤, 液膜扩散才是主控步骤^[19,20]. 床层高度越大, 穿透时间和穿透吸附容量

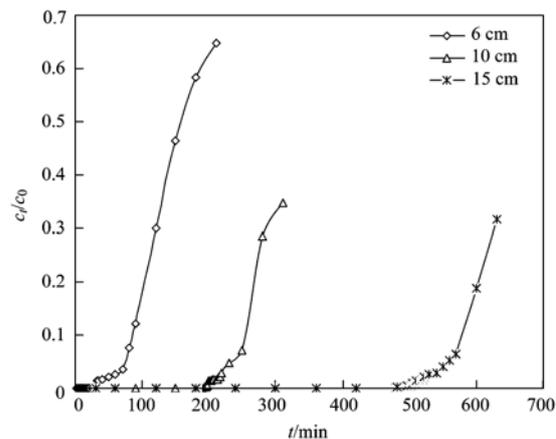


图 3 固定床高度对穿透曲线的影响

Fig. 3 Effects of bed depth on the breakthrough curves

越大,这是因为随着固定床高度的增加,吸附剂用量增加,吸附位点增多,与 PO_4^{3-} 的接触时间增多.

2.2.2 流量对穿透曲线的影响

当固定床高度为 10 cm,溶液初始浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,流量对穿透曲线的影响如图 4 所示. 随着流量的增大,穿透时间和穿透吸附量减小,主要因为流量增加,传质速率增大,吸附质与吸附剂接触时间减小,单位固定床体积吸附的 PO_4^{3-} 增加,固定床吸附饱和较快. 流量增大,穿透曲线变得陡峭,说明传质速率变大,传质区移动的速率变快,传质区长度缩短,床体利用率大,说明液膜扩散是吸附过程的控制步骤^[20, 21].

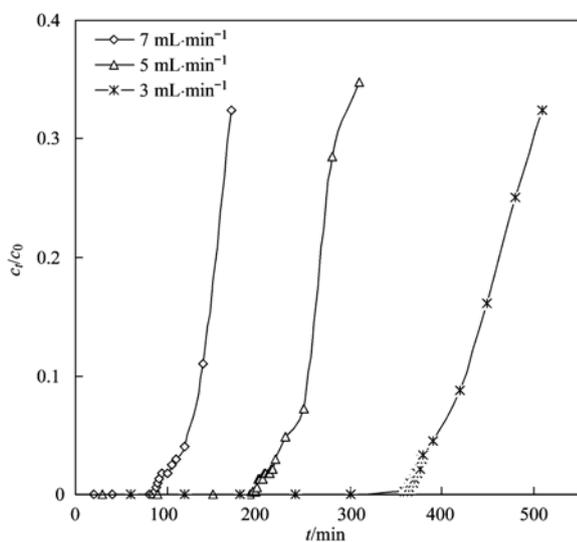


图 4 流量对穿透曲线的影响

Fig. 4 Effects of flow rate on the breakthrough curves

2.2.3 溶液初始浓度对穿透曲线的影响

当固定床高度为 10 cm,流量为 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,溶液初始浓度对穿透曲线的影响见图 5. 随着溶液初始浓度的增大,穿透曲线斜率增大,穿透时间和穿透吸附量减小. 因为随着溶液初始浓度的增大,入口溶液和吸附剂上的溶液浓度梯度增大,质量传递的动力增大,故吸附剂吸附饱和较快,穿透时间和穿透吸附容量减小^[22].

2.2.4 溶液初始 pH 值对穿透曲线的影响

当溶液初始浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,流量为 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,固定床高度为 10 cm 时,用 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 或 HCl 调节溶液的初始 pH 值,溶液初始 pH 值对穿透曲线的影响如图 6 所示. 从中可见,弱碱性条件下,穿透时间和穿透吸附容量较大,但 pH 为 6 和 7、8 和 9 时,穿透时间和穿透吸附容量变化不明显. 主要因为当初始 $\text{pH} < 7$ 时,溶液中溶质主

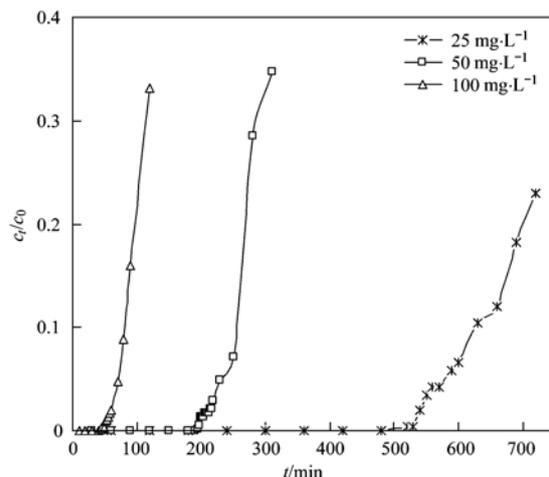


图 5 溶液初始浓度对穿透曲线的影响

Fig. 5 Effects of initial concentration on the breakthrough curves

要以 H_2PO_4^- ($\text{p}K_{a1} = 2.12$) 存在,当初始 $\text{pH} > 7$ 时,溶液中溶质主要以 HPO_4^{2-} ($\text{p}K_{a2} = 7.20$) 存在,碱性条件下,吸附剂对 HPO_4^{2-} 的静电引力较大,故穿透时间和穿透吸附量较大^[23].

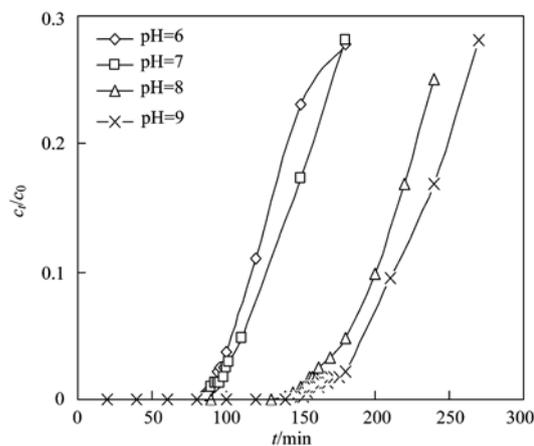


图 6 溶液初始 pH 值对穿透曲线的影响

Fig. 6 Effects of initial pH on the breakthrough curves

2.2.5 解吸再生

当溶液初始浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,流量为 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,固定床高度为 10 cm 时,再生次数对穿透曲线和吸附量的影响见图 7 和表 1. 从中可知, MG Mg-Al CLDH 对 PO_4^{3-} 的第一次穿透吸附量为 $13.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,是 G Mg-Al CLDH 的 6 倍以上. MG Mg-Al CLDH 经解吸再生后,第一次和第二次再生率分别为 126.24%、98.07%,这主要因为, MG Mg-Al CLDH 的层间阴离子主要是 CO_3^{2-} 和 Ac^- ^[11],经解吸再生后,层间阴离子主要为 Cl^- ,由层状氢氧化镁铝与无机阴离子的结合能力顺序^[24, 25]可知, Cl^- 与层板结合强度减弱,层间距增大, PO_4^{3-} 更容易与

Cl^- 发生离子交换, 故再生率大于 100%, 这与 XRD 结果是一致的. 由此看出, Mg-Al LDH 经改性与成型后可作为脱除 PO_4^{3-} 的有效吸附剂, 能够满足污水综合排放一级标准 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

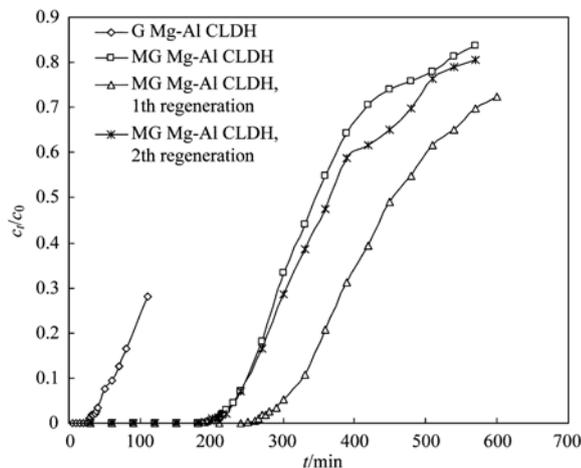


图 7 再生次数对穿透曲线的影响

Fig. 7 Effects of regeneration time on the breakthrough curves

表 1 再生次数对吸附的影响

Table 1 Effect of regeneration time on the adsorption

项目	G Mg-Al CLDH	MG Mg-Al CLDH	MG Mg-Al CLDH	MG Mg-Al CLDH
次数	0	0	1	2
t_b/min	28	210	265	206
$q_b/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	1.96	13.49	17.03	13.23
RE/%			126.24	98.07

2.3 MG Mg-Al CLDH 对某污水处理厂二级出水的处理

当流量为 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 固定床高度为 10 cm 时, 用 MG Mg-Al CLDH 对某污水处理厂二级出水中 PO_4^{3-} 进行吸附脱除, 其中 PO_4^{3-} 的初始浓度为 $4.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸附穿透曲线如图 8 所示. 从中可知, 由于所取水样有限, 在实验时间 510 min 内, PO_4^{3-} 一直未穿透, 吸附量为 $2.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 由此看出, 当溶液初始浓度低至 $4.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, MG Mg-Al CLDH 仍可有效脱除废水中的磷, 使处理后水质满足污水综合排放一级标准 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.4 MG Mg-Al CLDH 脱除青岛不同地段海水中的 PO_4^{3-}

当流量为 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 固定床高度为 10 cm 时, 用 MG Mg-Al CLDH 对青岛不同地段海水 (1~3 号) 中 PO_4^{3-} 进行吸附脱除. 其中, 1~3 号海水中 PO_4^{3-} 的初始浓度分别为 1.82 、 0.38 、 $1.10 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据海水水质一级标准^[15], PO_4^{3-} 的穿

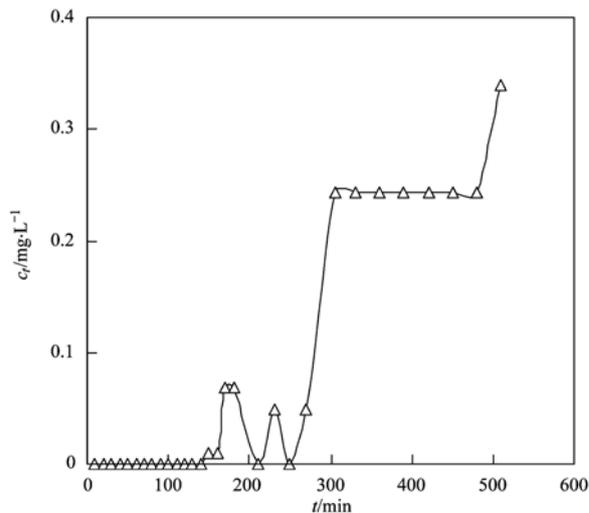


图 8 MG Mg-Al CLDH 对某污水处理厂二级出水的处理

Fig. 8 Treatment of the wastewater by MG Mg-Al CLDH

透浓度定为 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即 $0.48 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 穿透曲线如图 9 所示. 从中可知, 1 号中 PO_4^{3-} 的穿透时间为 50 min, 穿透吸附量为 $0.075 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$. 2 号和 3 号中 PO_4^{3-} 在实验时间内一直未达到穿透点. 说明即使 PO_4^{3-} 浓度低至 $0.38 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, MG Mg-Al CLDH 还是能将其有效脱除, 使其达到海水水质一级标准.

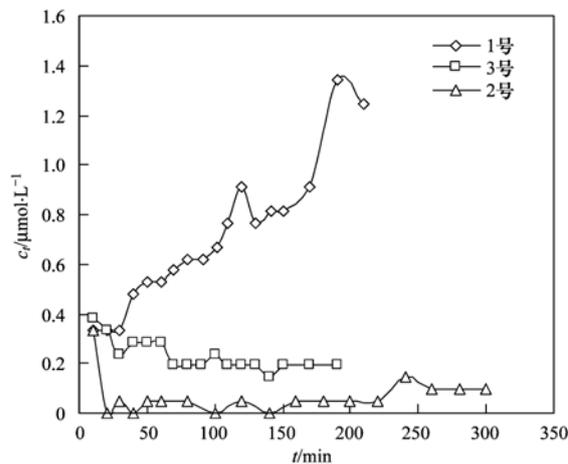


图 9 MG Mg-Al CLDH 对青岛不同地段海水中 PO_4^{3-} 的脱除

Fig. 9 Removal of PO_4^{3-} from seawater coming from different positions by MG Mg-Al CLDH

3 结论

(1) 本研究采用沉积法对 Mg-Al LDH 进行了改性与成型, 并采用固定床吸附实验研究了 MG Mg-Al CLDH 对水溶液、废水、海水中 PO_4^{3-} 的吸附和解吸再生性能. 结果证明 MG Mg-Al CLDH 能够有效脱除水溶液、废水、海水中 PO_4^{3-} , 能够满足污水综合

排放一级标准或海水水质一级标准,解决了 Mg-Al LDH 在实际应用过程中存在粉末易堵塞床体、无法实现固液分离和再生的问题,同时为不同水体中磷的脱除提供了一条新型可行之路。

(2) MG Mg-Al CLDH 对 PO_4^{3-} 脱除主要是通过离子交换和“结构记忆”效应共同实现的。MG Mg-Al CLDH 对 PO_4^{3-} 的穿透吸附量是未改性时的 6 倍以上。当 MG Mg-Al CLDH 达到吸附饱和后,用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 和 $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 解吸,然后用 300 mL 质量分数为 25% 的 MgCl_2 进行再生,再生率为 126.24%。

(3) MG Mg-Al CLDH 对 PO_4^{3-} 的穿透曲线受固定床高度、流量、溶液初始浓度、溶液初始 pH 值的影响。随着固定床高度的增大,穿透曲线形状和斜率基本保持不变,穿透时间和穿透吸附量增大;随着液体流量和溶液初始浓度增加,穿透曲线斜率增大,穿透时间和穿透吸附量减小;当溶液呈弱碱性时,穿透时间和穿透容量较大。液膜扩散是吸附过程的主控步骤。

(4) 当溶液初始浓度低至 $4.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, MG Mg-Al CLDH 能将某污水处理厂二级出水中 PO_4^{3-} 有效脱除,满足污水综合排放一级标准。当海水中 PO_4^{3-} 浓度低至 $0.38 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, MG Mg-Al CLDH 仍将其有效脱除,达到海水水质一级标准。

参考文献:

- [1] Ferreira O P, Moraes S G, Durán N, *et al.* Evaluation of boron removal from water by hydrotalcite-like compounds [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(1): 80-88.
- [2] Vreysen S, Maes A. Adsorption mechanism of humic and fulvic acid onto Mg/Al layered double hydroxides [J]. *Applied Clay Science*, 2008, **38**(3-4): 237-249.
- [3] Kameda T, Saito S, Umetsu Y. Mg-Al layered double hydroxide intercalated with ethylene-diaminetetraacetate anion: Synthesis and application to the uptake of heavy metal ions from an aqueous solution [J]. *Separation and Purification Technology*, 2005, **47**(1-2): 20-26.
- [4] Xing K, Wang H Z, Guo L G, *et al.* Adsorption of tripolyphosphate from aqueous solution by Mg-Al- CO_3 -layered double hydroxides [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, **328**(1-3): 15-20.
- [5] 邢坤, 王海增, 李晓玉. 焙烧层状氢氧化镁铝对水溶液中 As(III) 和 As(V) 的吸附性能比较 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 748-754.
- [6] 邢坤, 王海增. 焙烧层状氢氧化镁铝对水溶液中亚硝酸盐的吸附脱除 [J]. *环境化学*, 2009, **28**(3): 373-378.
- [7] Yoshioka T, Kameda T, Miyahara M, *et al.* Removal of tetrafluoroborate ion from aqueous solution using magnesium-aluminum oxide produced by the thermal decomposition of a hydrotalcite-like compound [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(5): 832-835.
- [8] Lü L, He J, Wei M, *et al.* Factors influencing the removal of fluoride from aqueous solution by calcined Mg-Al- CO_3 layered double hydroxides [J]. *Journal of Hazardous Materials B*, 2006, **133**(1-3): 119-128.
- [9] 邢坤, 王海增, 郭鲁钢, 等. 三聚磷酸钠在层状氢氧化镁铝及其焙烧产物上的吸附特性 [J]. *环境化学*, 2007, **26**(6): 792-796.
- [10] 邢坤, 王海增. 硝酸盐在层状氢氧化镁铝及其焙烧产物上的吸附特性比较 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1340-1346.
- [11] 邢坤, 王海增, 李晓玉, 等. 改性成型的镁铝水滑石的制备方法及应用 [P]. 中国专利, CN 101386424A, 2011-02-02.
- [12] Park J, Regalbutto J R. A simple, accurate determination of oxide PZC and the strong buffering effect of oxide surfaces at incipient wetness [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995, **175**(1): 239-252.
- [13] 罗沛, 孙红文, 张鹏. pH 和 Ni^{2+} 对人工纳米氧化硅吸附的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2882-2888.
- [14] GB 8978-1996, 污水综合排放标准 [S].
- [15] GB 3097-1997, 海水水质标准 [S].
- [16] 高延耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [17] GB 11893-89, 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法 [S].
- [18] Badreddine M, Legrouri A, Barroug A, *et al.* Ion exchange of different phosphate ions into the zinc-aluminium-chloride layered double hydroxide [J]. *Materials Letters*, 1999, **38**(6): 391-395.
- [19] 杨骏, 陈诵英, 彭少逸. 固定床吸附废水中 Cr(VI) 离子的数学模型 [J]. *化学反应工程与工艺*, 1996, **12**(2): 171-176.
- [20] 杨骏, 李永旺, 秦张峰, 等. 液固体系固定床吸附器流出曲线预测模型——活性炭吸附水中酚的研究 [J]. *化工学报*, 1996, **47**(2): 178-183.
- [21] Ko D C K, Porter J F, McKay G. Optimised correlations for the fixed-bed adsorption of metal ions on bone char [J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, **55**(23): 5819-5829.
- [22] Goel J, Kadirvelu K, Rajagopal C, *et al.* Removal of lead(II) by adsorption using treated granular activated carbon: batch and column studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **125**(1-3): 211-220.
- [23] 庞会玲, 杨桂朋, 高先池, 等. pH 及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 129-134.
- [24] Miyata S. Anion-exchange properties of hydrotalcite-like compounds [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1983, **31**(4): 305-311.
- [25] 陆英, 程翔, 邢波, 等. 尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2868-2874.

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