

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

**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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 ..... 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 ..... 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM<sub>2.5</sub>浓度日变化及气象条件影响分析 ..... 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 ..... 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 ..... 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 ..... 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 ..... 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 ..... 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 ..... 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH<sub>3</sub>和N<sub>2</sub>O)减排效果比较:以夏玉米季为例 ..... 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量的观测 ..... 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>分压特征分析 ..... 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 ..... 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 ..... 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 ..... 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 ..... 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 ..... 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 ..... 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 ..... 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 ..... 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 ..... 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 ..... 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 ..... 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 ..... 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 ..... 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中的酞酸酯的污染现状与分布特征 ..... 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 ..... 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 ..... 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce<sup>3+</sup>与Cu<sup>2+</sup>协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 ..... 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 ..... 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO<sub>2</sub>光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 ..... 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 ..... 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 ..... 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 ..... 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 ..... 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 ..... 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 ..... 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 ..... 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 ..... 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 ..... 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 ..... 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硝酸盐的吸附解吸作用研究 ..... 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 ..... 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>的吸附特性 ..... 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 ..... 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 ..... 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 ..... 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 ..... 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 ..... 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 ..... 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 ..... 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

# 新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价

王文东<sup>1,2</sup>, 刘荟<sup>1</sup>, 张银婷<sup>1</sup>, 杨生炯<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 嘉兴 314006)

**摘要:** 采用高温焙烧法制备了一种以给水厂终端铝盐混凝污泥为原料的新型吸附剂. 通过静态吸附实验探讨其对氨氮的吸附性能, 实验中主要考察了不同初始 pH、接触时间和温度等因素对氨氮吸附效果的影响, 同时分析了吸附剂对氨氮的吸附等温线, 动力学和热力学特性. 结果表明, 在中性条件下吸附剂对氨氮有较好的去除效果; 吸附过程在 6 h 基本达到平衡, 吸附过程符合准二级动力学模型, Langmuir 吸附模型可较好地拟合吸附剂对氨氮的吸附; 热力学参数表明陶粒吸附剂对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的吸附过程是自发的、吸热反应 ( $\Delta G^0 < 0$ ,  $\Delta H^0 > 0$ ), 且由平均吸附能得到该吸附属于物理吸附. 因此, 混凝污泥处理氨氮废水具有良好的应用前景.

**关键词:** 混凝污泥; 吸附; 氨氮; 拟二级反应动力学; 高温焙烧

中图分类号: X131; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3186-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.046

## Preparation and $\text{NH}_4^+-\text{N}$ Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges

WANG Wen-dong<sup>1,2</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, ZHANG Yin-ting<sup>1</sup>, YANG Sheng-jiong<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Environmental Technology and Ecology, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

**Abstract:** A novel adsorbent was prepared by high-temperature calcination using waterworks terminal aluminum coagulation sludge as a raw material. This study discussed ammonia nitrogen adsorption performance of the adsorbent by static adsorption test, mainly investigated the influences of different initial pH, contact time and temperatures on the ammonia adsorption effect, and also analyzed the adsorption isotherms, kinetic and thermodynamic properties of adsorbent on the ammonia nitrogen. Experimental results showed that the adsorbent had a better effect for ammonia removal under neutral conditions; the adsorption process was basically balanced within 6 h, and it followed the pseudo second-order model. Langmuir adsorption model could be better fitted for the adsorption of ammonia adsorbent; the thermodynamic parameters indicated that the adsorption process of ceramic adsorbents on  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  was a kind of spontaneous, endothermic reaction ( $\Delta G^0 < 0$ ,  $\Delta H^0 > 0$ ), and it was found to be a physical adsorption based on the average adsorption energy. Thus, treating ammonia wastewater by coagulation sludge has a good prospect.

**Key words:** coagulation sludge; adsorption; ammonia nitrogen; pseudo second-order kinetics; high-temperature calcination

氨氮是水环境中氮的主要形态之一<sup>[1]</sup>, 是引起水体富营养化和环境污染的一种重要物质. 氨氮浓度过高会抑制自然硝化, 引起水体缺氧, 降低水体自净能力<sup>[2]</sup>. 就目前来说, 吸附法是去除氨氮最有效且廉价的方法之一, 研究较多的吸附剂主要为沸石<sup>[3-5]</sup>、沉积物<sup>[6-8]</sup>、凹凸棒土<sup>[9]</sup>和植物材料<sup>[10]</sup>等. 当前我国陶粒主要以黏土陶粒为主, 黏土原料的来源绝大部分取自于耕地, 是一条不符合我国国情的原料路线<sup>[11]</sup>. 污水处理过程中会产生大量剩余污泥, 这些剩余污泥的处理处置费用已占到水处理总成本的 50% ~ 80%<sup>[12,13]</sup>. 本课题组以自来水厂的混凝污泥为主要原料, 开发出一种对磷元素具有良好吸附去除性能的新型过滤材料. 发现除总磷外, 滤料对污水中的氨氮也具有一定的去除性能. 这可能与氨氮在滤料上的吸附作用有关, 然而现有研究对上述过程发生的特点和原理的关注还较少.

本研究通过制备工艺优化强化了上述吸附材料的氨氮去除性能, 系统评价上述过程发生的热力学和动力学特征, 初步提出了氨氮和新型吸附材料间的作用途径, 以期为污水中氮磷等营养元素的同步吸附去除提供理论支撑.

### 1 材料与方法

#### 1.1 吸附剂的制备

本实验制备吸附剂的主要原料为西安曲江水厂的混凝污泥, 由于混凝污泥中本身含有天然的腐殖酸大分子有机物<sup>[14-16]</sup>, 在吸附剂的制作过程中人为

收稿日期: 2015-12-23; 修订日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(21007050); 教育部博士点基金项目(20106120120014); 陕西省自然科学基金项目(09JS029)

作者简介: 王文东(1980~), 男, 副教授, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: wwd@xauat.edu.cn

加入了一定量的腐殖酸,目的是使腐殖酸在高温下烧结过程中分解,增加吸附剂比表面积,且不会对处理水造成二次污染;高岭土具有一定的黏性,与混凝污泥混合烧结可使成品吸附剂易于成型. 具体制作过程如下:①处理掉混凝物中的小固体杂物,在 105℃ 的烘箱内烘干;②上述混凝污泥中加入高岭土和腐殖酸,控制混凝污泥:高岭土:腐殖酸 = 10:7:2,调节含水率为 60% ~ 65%,混合均匀. 人工制作成 4 ~ 10 mm 的球形颗粒;③用马弗炉(SX2-4-13)烧制成品陶粒吸附剂,将球形颗粒放入马弗炉中,控制烧结温度为 700℃,时间为 2 h,球形颗粒在马弗炉中自然降温到 200℃ 左右时取出,待用. 烧制好的成品球形吸附剂颗粒大小为 2 ~ 4 mm.

## 1.2 静态吸附实验

本实验采用静态吸附法,主要考察了不同 pH 值、接触时间、温度对吸附实验的影响,并进行了吸附等温线、动力学和热力学对吸附的影响研究. 所有吸附实验均重复 3 次,数据分析时取平均值,具体实验如下:称取若干份吸附剂样品 5.0 g,放入到一系列的 50 mL 比色管中,分别加入 50 mL 不同浓度的氨氮溶液. 用 1% 的 HNO<sub>3</sub> 和 1% 的 NaOH 调节 pH,将各样品瓶置于恒温培养箱中,在特定温度下静置 24 h 后,取上清液,过 0.45 μm 的滤膜,采用纳氏试剂比色法<sup>[17]</sup>测定氨氮含量,计算吸附容量[公式(1)]:

$$q_e = \frac{(c_i - c_e) \times V}{m} \quad (1)$$

式中, $c_i$  为氨氮的初始浓度(mg·L<sup>-1</sup>); $c_e$  为氨氮的平衡浓度(mg·L<sup>-1</sup>); $V$  为氨氮溶液体积(L); $m$  为陶粒吸附剂的投加量(g).

## 1.3 吸附剂零点电荷 pH<sub>zpc</sub> 的测定

零点电荷 pH<sub>zpc</sub> 的测定方法<sup>[18]</sup>:量取 50 mL 浓

度为 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaNO<sub>3</sub> 溶液于一系列碘量瓶中,初调 pH 为 2 ~ 11,平衡 2 h 后测溶液 pH 值,记为 pH<sub>i</sub>;然后向瓶中投入 0.15 g 陶粒吸附剂,用 N<sub>2</sub> 吹脱 3 ~ 5 min 后,在 25℃、160 r·min<sup>-1</sup> 下于恒温振荡箱内 72 h,最后测定上清液 pH 值,记为 pH<sub>f</sub>;以 pH<sub>i</sub>-pH<sub>f</sub> 对 pH<sub>i</sub> 作图,所得的曲线与横坐标的交点即为 pH<sub>zpc</sub>[图 1(a)]. 当 pH < pH<sub>zpc</sub> 时,吸附剂表面带正电荷,在库仑力的作用下可以吸附阴离子;当 pH = pH<sub>zpc</sub> 时,吸附剂表面净电荷为零;当 pH > pH<sub>zpc</sub> 时,吸附剂表面带负电荷,会排斥阴离子.

## 1.4 分析方法

采用傅里叶红外(IRPrestige-21,日本)观察滤料的表观形貌和物质组成,吸附剂表面的 Zeta 电位采用 Zeta 电位仪(ZS90,英国);氨氮含量采用分光光度计(DR5000 紫外分光光度计,美国)测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 初始 pH 对氨氮吸附的影响

图 2 为不同 pH 下陶粒吸附剂对氨氮吸附效果的影响,可以看出,在酸性和中性条件下,随着 pH 的升高,溶液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平衡浓度逐渐降低;而当溶液呈碱性时,随着 pH 的继续升高,吸附效果却有下降趋势. 说明在中性条件下,对滤料对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的吸附去除效果最好. 这是因为酸性条件下溶液中 H<sup>+</sup> 浓度较大,可与滤料表面的 ≡M—OH 发生中和反应,使滤料的有效吸附位点数量下降<sup>[19]</sup>. 同时,由于 H<sup>+</sup> 的离子半径明显小于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,部分 H<sup>+</sup> 还将吸附在滤料表面,与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 存在竞争吸附作用<sup>[20,5]</sup>,不利于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的去除. 由图 1(a) 可知,吸附剂的 pH<sub>zpc</sub> 值在 7.8 左右. 这意味着碱性条件下吸附剂表面将呈负电性[图 1(b)]. 随着溶液 pH 值的

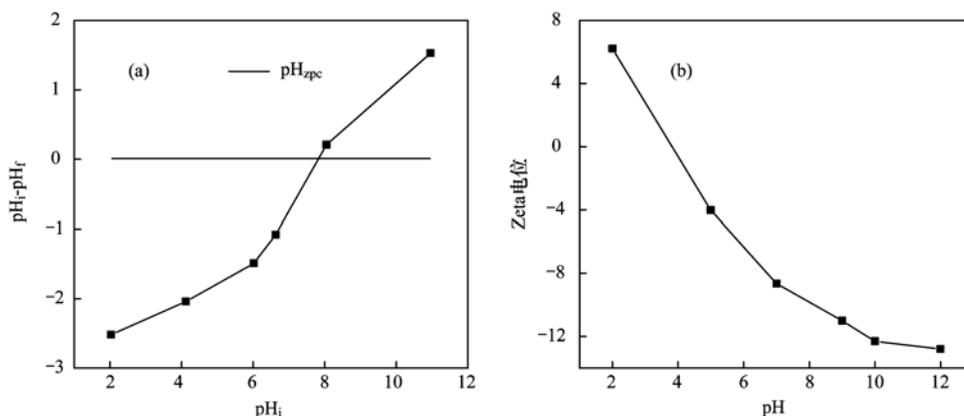


图 1 陶粒吸附剂的 pH<sub>zpc</sub> 及不同 pH 下陶粒表面的 Zeta 电位

Fig. 1 The pH<sub>zpc</sub> of ceramic adsorbents and Zeta potential of ceramic surface at various pH

增加吸附剂表面的负电荷数量越多. 而同时, 水相中的游离  $\text{NH}_4^+$  将与  $\text{OH}^-$  反应形成电中性的  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 离子态的  $\text{NH}_4^+$  减少<sup>[21]</sup>. 这可能是碱性条件下  $\text{NH}_4^+$  的吸附量反而下降的主要原因.

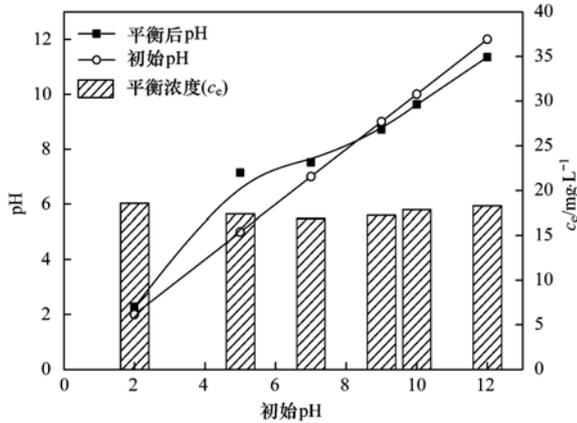


图2 pH对除氨氮效果的影响

Fig. 2 Effect of pH on  $\text{NH}_4^+$ -N removal

氨氮吸附前后的傅里叶红外光谱 (FT-IR) 见图 3, 其中  $3\ 600 \sim 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$  的宽峰是结晶水的特征频率区;  $1\ 680 \sim 1\ 630\ \text{cm}^{-1}$  范围内一系列峰为  $\text{C}=\text{O}$  基的伸缩振动区域, 在  $1\ 081\ \text{cm}^{-1}$  处出现  $\text{C}-\text{H}$  面内弯曲振动峰, 而  $880 \sim 680\ \text{cm}^{-1}$  之间是由于苯环的  $\text{C}-\text{H}$  键面外弯曲振动吸收所致<sup>[22]</sup>. 氨氮吸附后的红外光谱图有偏移, 如吸附前的  $3\ 451$ 、 $1\ 638$ 、 $1\ 081$ 、 $779\ \text{cm}^{-1}$ , 吸附后为  $3\ 450$ 、 $1\ 637$ 、 $1\ 055$ 、 $777\ \text{cm}^{-1}$ , 对应的化学键有  $\text{O}-\text{H}$ 、 $\text{C}=\text{O}$  和  $\text{C}-\text{H}$ , 说明这几种可能和吸附有关或受吸附的影响<sup>[10]</sup>. 且  $1\ 504 \sim 1\ 550\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{N}-\text{H}$  弯曲振动<sup>[23]</sup>, 图 3 中可以看出吸附后在  $1\ 510\ \text{cm}^{-1}$  处出现小峰, 证明吸附后氨氮结合在吸附剂表面.

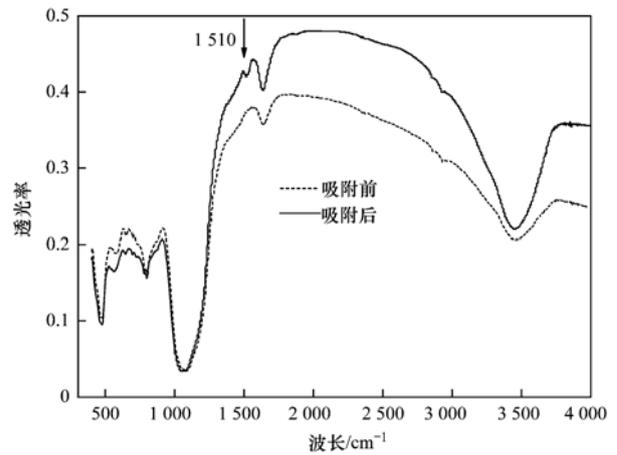


图3 氨氮吸附前后陶粒的傅里叶红外光谱

Fig. 3 FT-IR spectra of the ceramic before and after adsorption of  $\text{NH}_4^+$ -N

### 2.2 吸附动力学

时间对吸附过程有很大的影响, 在吸附过程中必须保证吸附剂与溶液有充分的接触时间, 才能使吸附剂发挥最大的吸附能力. 从图 4(a) 中可看出, 吸附基本可以分为 3 个阶段, 在  $0 \sim 1\ \text{h}$  内, 吸附剂对氨氮的吸附容量增加很快, 从  $0.019\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  增至  $0.048\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 第 2 个阶段为  $1 \sim 6\ \text{h}$ , 吸附容量继续增加, 但与第 1 阶段相比, 吸附速率略有放缓趋势;  $6\ \text{h}$  后吸附容量基本稳定, 吸附过程趋于平衡. 这主要是由于开始时刻陶粒表面空的吸附点位较多, 且溶液与陶粒表面液膜之间的浓度梯度较大, 氨氮扩散速度较快, 吸附过程也能很快进行, 而后随着吸附点位越来越少, 扩散速度减慢, 陶粒对氨氮的吸附放缓, 最终达到吸附平衡. 为了探讨影响吸附的速率控制步是氨氮的扩散还是氨氮与陶粒表面结合的过程, 需要对吸附过程进行准一级和准二级动力学拟合.

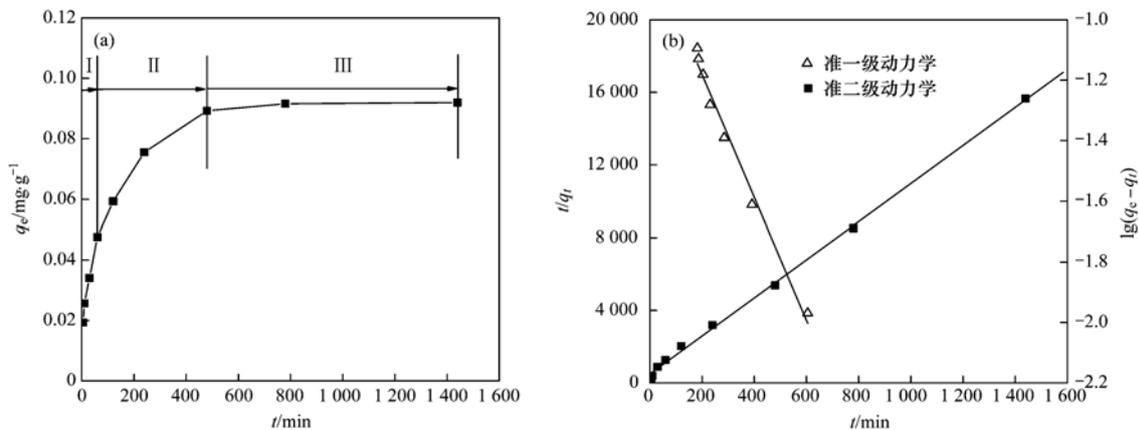


图4 时间对氨氮吸附效果的影响及准一级动力学和准二级动力学拟合

Fig. 4 Effect of adsorption time on ammonia nitrogen removal and fitting of pseudo first-order kinetic model and pseudo second-order kinetic model

准一级动力学模型基于假定吸附受扩散步骤控制, 吸附速率正比于  $q_e$  与  $t$  时刻  $q_t$  的差值. 可以用公式(3)来描述准一级动力学模型:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

式中,  $q_e$  为平衡吸附量;  $q_t$  为  $t$  时刻平衡吸附量;  $k_1$

为准一级吸附速率常数.

积分后:

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 t \quad (4)$$

以  $\lg(q_e - q_t)$  对  $t$  作图[图 4(b)], 根据斜率和截距可求得  $q_e$  和  $k_1$  的值(表 1), 分析实验数据是否符合准一级动力学.

表 1 准一级动力学和准二级动力学参数

Table 1 Parameters of pseudo first-order kinetic model and pseudo second-order kinetic model

| 准一级动力学模型                          |       |       | 准二级动力学模型                          |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|
| $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | $k_1$ | $R^2$ | $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | $k_2$ | $R^2$ |
| 0.073                             | 0.002 | 0.98  | 0.095                             | 0.228 | 0.99  |

准二级动力学模型是基于假定吸附速率受化学吸附机制的控制, 这种化学吸附涉及到吸附剂与吸附质之间的电子共用或电子转移. 可用下式表示:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

可简化为:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

式中,  $k_2$  为准二级吸附速率常数, 其它参数同准一级动力学. 通过  $t/q_t$  对  $t$  作图, 如果吸附动力学符合准二级动力学, 可得到一条直线[图 4(b)]. 根据直线的斜率和截距, 可得到  $q_e$  和  $k_2$  的值. 由表 1 拟合结果可得出相关系数大小关系: 准二级动力学模型 ( $R^2 = 0.99$ ) > 准一级动力学模型 ( $R^2 = 0.98$ ), 即相对于准一级动力学模型, 准二级动力学模型拟合最佳, 能准确揭示吸附的整个过程. 所以图 4 中陶粒的吸附过程可以很好地符合准二级动力学.

### 2.3 吸附热力学

标准吉布斯自由能变化量 ( $\Delta G^\theta$ ), 标准反应焓变 ( $\Delta H^\theta$ ), 标准反应熵变 ( $\Delta S^\theta$ ) 与固-液分配系数  $K_D$  之间的关系为<sup>[24]</sup>:

$$K_D = \frac{c_0 - c_t}{c_t} \times \frac{V}{m} \quad (7)$$

$$\ln(K_D) = \frac{-\Delta H^\theta}{R \cdot T} + \frac{\Delta S^\theta}{R} \quad (8)$$

$$\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T \cdot \Delta S^\theta \quad (9)$$

式中,  $c_0$  为溶液中氨氮的初始浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $c_t$  为

时刻溶液中氨氮浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $V$  为溶液体积 (mL),  $m$  为陶粒吸附剂的投加量 (g);  $R$  为理想气体常数 [ $\text{kJ}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$ ];  $T$  为绝对温度 (K). 以  $\ln(K_D)$  对  $1000/T$  作图(图 5), 两者呈线性关系, 其斜率为  $-\Delta H^\theta/R$ , 截距为  $\Delta S^\theta/R$ , 求得  $\Delta H^\theta$  和  $\Delta S^\theta$ , 代入到公式中, 可得到  $\Delta G^\theta$ . 从表 2 中可以看出  $\Delta G^\theta$  为负值, 说明吸附过程可以自发进行, 随着温度升高,  $\Delta G^\theta$  减少, 说明高温有利于吸附反应的进行.  $\Delta H^\theta$  为正值, 说明吸附  $\text{NH}_4^+$  为吸热反应且吸附过程增加了固-液界面上物质的无序程度<sup>[5]</sup>. 已有研究表明<sup>[25]</sup> 物理吸附的自由能变范围为  $-20 \sim 0 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 本实验中的吸附剂对  $\text{NH}_4^+$  吸附的  $\Delta G^\theta$  在  $-5.916 \sim -3.176 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  之间, 因此认为对  $\text{NH}_4^+$  的吸附可能为物理吸附.

平均吸附能  $E$  是判断吸附类型的重要指标, 可用式(10)来表达:

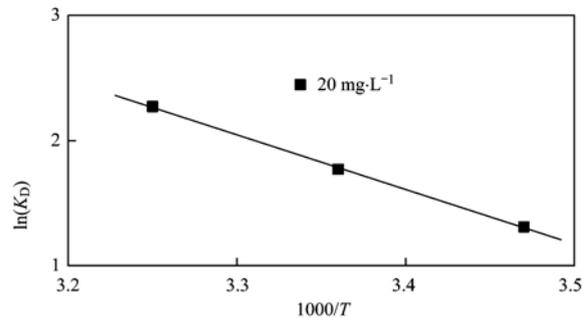


图 5 陶粒吸附氨氮  $\ln(K_D)$  与  $1000/T$  的关系

Fig. 5 Plot of  $\ln(K_D)$  vs.  $1000/T$  for the adsorption of ammonia

表 2 不同温度下氨氮吸附的热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters for the adsorption of ammonia at various temperatures

| $\Delta H^\theta/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | $\Delta S^\theta/\text{kJ}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$ | $R^2$ | $\Delta G^\theta/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ |       |       |
|---|--|-------|---|-------|-------|
|   |  |       | 288 K   | 298 K | 308 K |
| 36.28   | 0.14   | 0.999 | -3.18   | -4.55 | -5.92 |

$$E = \frac{1}{\sqrt{-2K}} \quad (10)$$

根据  $D-R$  模型的线性形式,以  $\ln(q_e)$  对  $\varepsilon^2$  作直线,见图 6,根据直线斜率可求得  $K$ .

$$\ln(q_e) = \ln(q_{\max}) + K\varepsilon^2 \quad (11)$$

其中:

$$\varepsilon = RT \ln\left(1 + \frac{1}{c_e}\right) \quad (12)$$

式中, $E$  为平均吸附能 ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ );  $K$  为与吸附能有关的常数, $\varepsilon$  为 Polanyi 势能 ( $\text{kJ}$ ),其余变量同前, $c_e$  的单位为  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ .

由此可得到温度在 15、25、35℃ 下滤料对氨氮的平均吸附能  $E$  分别为 7.84、6.43、5.45  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ . 当  $1 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} < E < 8 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  时,吸附为以范德华力为主的物理吸附<sup>[26]</sup>,所以再次证明吸附剂对氨氮的吸附属于物理吸附过程.

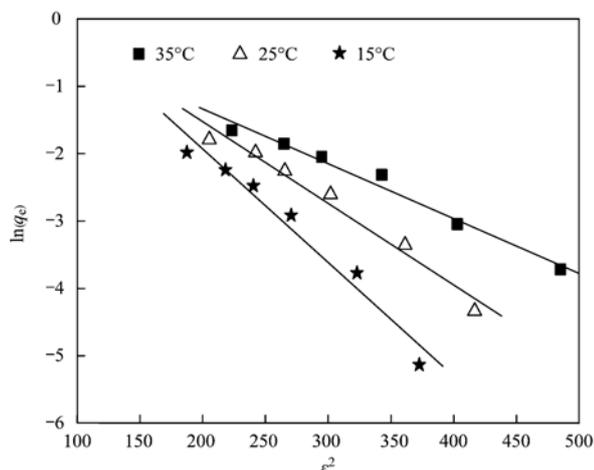


图 6  $\varepsilon^2$  与  $\ln(q_e)$  的关系

Fig. 6 Plot of  $\varepsilon^2$  vs.  $\ln(q_e)$

## 2.4 吸附等温线

由于影响吸附性能的因素可能很复杂,因此须通过吸附等温线实验来确定. 吸附等温线是由吸附容量  $q_e$  和平衡浓度  $c_e$  的关系所绘出的曲线,由于热力学结果证明陶粒对氨氮的吸附属于物理吸附,所以进行 Langmuir 吸附等温线拟合. Langmuir 吸附等温方程式:

$$q_e = \frac{q_m \cdot K_a \cdot c_e}{1 + K_a \cdot c_e} \quad (13)$$

式中, $q_e$  为平衡时的吸附量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), $c_e$  为平衡时的溶液浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $q_m$  是吸附剂饱和吸附量, $K_a$  是 Langmuir 等温吸附方程式常数(表 3).

等温吸附实验考察了 3 种温度对氨氮吸附过程的影响. 控制氨氮的初始浓度为 5、10、20、30、40、

60  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,滤料投加量为 100  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,接触时间为 24 h,在该条件下进行 Langmuir 吸附等温线拟合. 从图 7 中可以看出,滤料对氨氮的吸附大致可以分为 2 个阶段:初始阶段,随着氨氮溶液浓度的增加,滤料对氨氮的吸附量增大,吸附等温线比较陡直,当平衡浓度增大到一定程度后,吸附作用逐渐减弱,吸附等温线趋于平缓. 图 7 中还可以看出,滤料对氨氮的吸附容量随着温度的升高而增加,Langmuir 吸附等温线可较好地拟合陶粒对氨氮的吸附效果 ( $R^2 > 0.99$ ),说明吸附过程主要表现为单分子层吸附.

表 3 Langmuir 吸附等温线参数

| Table 3 Parameters of Langmuir adsorption isotherm model |          |       |       |
|--|----------|-------|-------|
| 温度/℃   | Langmuir |       |       |
|  | $q_m$    | $K_a$ | $R^2$ |
| 35   | 0.486    | 0.024 | 0.99  |
| 25   | 0.394    | 0.018 | 0.99  |
| 15   | 0.350    | 0.010 | 0.98  |

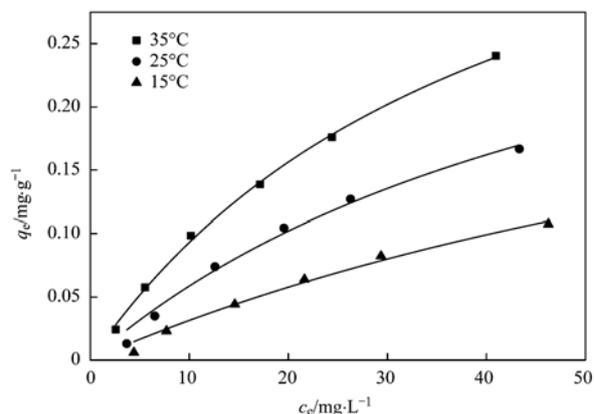


图 7 Langmuir 吸附等温曲线

Fig. 7 Curves of Langmuir adsorption isotherm model

## 3 结论

给水厂混凝污泥制备的吸附剂对氨氮的吸附受 pH 的影响较大,在中性条件下,吸附效果最好. 6 h 后吸附基本达到平衡,吸附过程遵循准二级动力学模型 ( $R^2 > 0.99$ ). 热力学结果证明陶粒对氨氮的吸附属于自发的吸热反应且吸附属于物理吸附,且温度升高使平衡向吸热的方向移动,所以温度升高有利于吸附的进行. Langmuir 吸附等温模型能较好地描述陶粒对氨氮的吸附特征,说明对氨氮的吸附主要表现为单分子层吸附,吸附效果与比表面积和孔道的发达程度密切相关,在实际应用中如何使陶粒吸附剂发挥更大的作用,需对滤料进行改性,有必要进行进一步的分析研究.

## 参考文献:

- [1] 赵钰, 单保庆, 张文强, 等. 子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 143-149.
- [2] 肖文浚. 改性微孔沸石的制备及其去除微污染源中氨氮的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [3] 王浩, 陈吕军, 温东辉. 天然沸石对溶液中氨氮吸附特性的研究[J]. 生态环境, 2006, **15**(2): 219-223.
- [4] 安莹, 王志伟, 张一帆, 等. 天然沸石吸附氨氮的影响因素[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(10): 3927-3932.
- [5] 刘玉亮, 罗固源, 阙添进, 等. 斜发沸石对氨氮吸附性能的试验分析[J]. 重庆大学学报, 2004, **27**(1): 62-65.
- [6] 郭芳, 陈坤琨, 姜光辉. 岩溶地下河沉积物对氨氮的等温吸附特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 501-507.
- [7] 王而力, 王雅迪, 王嗣淇. 西辽河不同粒级沉积物的氨氮吸附-解吸特征[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(9): 1016-1023.
- [8] 王而力, 王嗣淇, 薛扬. 沉积物不同天然有机组分对氨氮吸附特征的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(5): 544-549.
- [9] 杨慧, 宁海丽, 裴亮. 凹凸棒土的氨氮吸附性能研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(2): 343-346.
- [10] 刘海伟, 刘云, 王海云, 等. 爬山虎茎粉对水体中氨氮的吸附特性[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(5): 683-688.
- [11] 贺君, 王启山, 任爱玲. 给水厂与污水厂污泥制陶粒技术研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(9): 1653-1657.
- [12] Bruus J H, Nielsen P H, Keiding K. On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering [ J ]. Water Research, 1992, **26**(12): 1597-1604.
- [13] Qi Y, Thapa K B, Hoadley A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties-a Review [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2011, **171**(2): 373-384.
- [14] 李彬, 王志伟, 安莹, 等. 膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 643-650.
- [15] 王彩霞, 张伟军, 王东升, 等. 过氧乙酸和亚铁联用调质强化活性污泥过滤脱水性能[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(8): 3975-3984.
- [16] 程祯, 刘永军, 刘喆, 等. 好氧污泥强化造粒过程中 EPS 的分布及变化规律[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2033-2040.
- [17] 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. 279-281.
- [18] 刘振中, 邓慧萍, 詹健, 等. 改性活性炭除亚硝酸盐的性能研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 780-786.
- [19] Yang S J, Ding D H, Zhao Y X, *et al.* Investigation of phosphate adsorption from aqueous solution using Kanuma mud: behaviors and mechanisms [ J ]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, **1**(3): 355-362.
- [20] Leyva-Ramos R, Monsivais-Rocha J E, Aragon-Piña A, *et al.* Removal of ammonium from aqueous solution by ion exchange on natural and modified chabazite [ J ]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(12): 2662-2668.
- [21] 马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 等. 牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1678-1685.
- [22] 何必繁. 污泥制备陶粒轻集料及其热动力学特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. 20-22.
- [23] 徐劼, 保积庆. 芹菜根细胞壁对镉的吸附固定机制及其 FTIR 表征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2605-2612.
- [24] El-Shahawi M S, Nassif H A. Retention and thermodynamic characteristics of mercury ( II ) complexes onto polyurethane foams[J]. Analytica Chimica Acta, 2003, **481**(1): 29-39.
- [25] Yu Y, Zhuang Y Y, Wang Z H. Adsorption of water-soluble dye onto functionalized resin [ J ]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, **242**(2): 288-293.
- [26] 孙艳丽, 林建伟, 黄宏, 等. 天然沸石同步去除水中氨氮和磷酸盐[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(8): 2470-2476.

## CONTENTS

|   |  |
|---|--|
| Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China .....  | CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)                 |
| Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China .....   | LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)            |
| Diurnal Variation of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date .....  | MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)                        |
| Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 .....  | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)      |
| Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang .....   | ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)                  |
| Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain .....  | JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)                 |
| Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City .....                        | ..... SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)         |
| Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City .....   | ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)         |
| Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case .....  | LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)                          |
| Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin .....   | GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)                  |
| Assessment of Gaseous Nitrogen (NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation .....       | ..... FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)         |
| Soil CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons ..... | WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)                                       |
| Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....   | ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)           |
| Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir .....  | ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)             |
| Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed .....                    | ..... WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)        |
| Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai .....  | XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)             |
| Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River .....  | WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)            |
| Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream .....   | LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)           |
| Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch .....  | LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)           |
| Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....  | ..... CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979) |
| Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area .....   | LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)             |
| Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region .....   | CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)                  |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China .....                        | ..... WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)    |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River .....  | CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)      |
| Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland .....  | WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)         |
| Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers .....   | LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)               |
| Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan .....   | CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)               |
| Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season .....   | ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)           |
| Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands .....                                     | ..... ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)   |
| Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce <sup>3+</sup> and Cu <sup>2+</sup> Ions .....   | ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)        |
| Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor .....   | DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)  |
| Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol .....  | XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)                                |
| Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO <sub>2</sub> in Aqueous Solution .....  | YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)               |
| Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....   | MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)                    |
| Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater .....   | LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)                |
| Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor .....   | WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)           |
| Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment .....   | LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)               |
| Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia .....   | GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)                    |
| Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition .....  | MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)                    |
| Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid .....  | HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)          |
| Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province .....   | WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)              |
| Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics .....  | ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)            |
| Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties .....  | FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)                 |
| Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method .....  | LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)                        |
| Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions .....                | ..... ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)         |
| Preparation and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges .....   | WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)           |
| Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions .....  | ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)             |
| Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid .....   | ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)      |
| Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization .....  | JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)         |
| Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA .....  | WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)       |
| Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance .....  | LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)                |
| Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils .....  | LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)               |

# 《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院   | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717   | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com  | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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