

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

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

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 张小玲,夏祥鳌,车慧正,汤洁,唐宜西,孟伟,董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 姚波,周凌晔,刘钊,张根,夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,栾天,马千里,王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 段卿,安俊琳,王红磊,缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM_{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较 程玉婷,王格慧,孙涛,成春雷,孟静静,任艳芹,李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM₁₀ 中主要水溶性离子的影响 王芳,陈强,张文煜,郭勇涛,赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 梁宗敏,杜睿,杜鹏瑞,王亚玲,李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 李璇,王雪松,刘中,吴梁,翁燕波,胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 王海林,王俊慧,祝春蕾,聂磊,郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO₂ 实验研究 夏芝香,项群扬,周旭萍,方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 孙鹏程,李晓璐,成钢,陆勇,吴昌敏,罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 邢建伟,钱薇微,绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 王明珠,张运林,施坤,高贇,刘刚,蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 殷燕,吴志旭,刘明亮,何剑波,虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 韩晓霞,朱广伟,许海,Steven W. Wilhelm,秦伯强,李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征:以军山湖为例 刘霞,钱奎梅,谭国良,邢久生,李梅,陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中²¹⁰Pb_{ex}和营养盐垂向分布特征及相关性分析 王小雷,杨浩,顾祝军,张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 姜烈,何江涛,姜永海,刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,王巍,蒋新跃,刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 王红宇,刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 孙德帅,郑强强,张晓东,方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd²⁺ 的影响 王建涛,孟昭福,杨亚提,杨淑英,李彬,马麟莉,许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 唐伟,郭悦,吴景贵,黄兆琴,代静玉 (2604)

TiO₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 李明洁,喻泽斌,陈颖,王莉,刘晴,刘钰鑫,何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用 朱江鹏,梅婷,彭云,葛思怡,李时银,王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 马楠,田耀金,杨广平,谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 王梦月,马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 刘佳,沈志强,周岳溪,曹蓉,李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 青亮,黄锦琼,余小巍,张素坤,杨艳艳,任明忠,温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 卫丹,万梅,刘锐,王根荣,张讯达,文晓刚,赵远,陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 李晓玲,彭永臻,柴同志,朱建平,王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 郭雪,毕春娟,陈振楼,王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 江敏,Le Huy Tuan,梅卫平,阮慧慧,吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 谢婷,张淑娟,杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,李绘,陈文文,张莉,胡婷,石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 张鸿,赵亮,何龙,柴之芳,沈金灿,杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 李磊,任景玲,刘素美,蒋增杰,杜金洲,方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例 王幼奇,白一茹,王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 李楚娴,孙荣国,王定勇,赵铮,张金洋,马明,张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评估 何秀婷,王奇,聂湘平,杨永涛,程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 张春荣,吴正龙,姚春卉,高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究 伯鑫,王刚,温柔,赵春丽,吴铁,李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 王辉,谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,窦静,李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 陈喆,铁柏清,雷鸣,刘孝利,叶长城,罗梅梅,毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 潘莹,胡正华,吴杨周,孙银银,盛露,陈书涛,肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 贾曼莉,郭宏,李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 王宁,彭胜,陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 牟姝君,李秀芬,任月萍,王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 赵晨阳,魏源送,葛振,钟佳,才兴,张媛丽,李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH₃、N₂O 和 NO 排放特征研究 丁钢强,韩圣慧,袁玉玲,罗琳,王立刚,李虎,李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 黄友福,许心雅,范良鑫,方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 王东梅,刘丹,刘庆梅,陶丽霞,刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 马兰,毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 赵志瑞,侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476,2556,2713,2770)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学

孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙

(青岛大学化学科学与工程学院, 青岛 266071)

摘要: 以燃煤废弃物粉煤灰作为吸附剂, 对活性红 23 与活性蓝 4、活性黄 4、酸性黑 1、酸性蓝 193 的混合染料溶液进行吸附性能研究. 结果表明, 在不同的混合体系中, 活性红 23 的脱色率基本保持在 60% ~ 70%; 体系中酸性染料的脱色率均超过 90%; 活性蓝 4 的脱色率高达 85%; 活性黄 4 的脱色率仅为 50%. 准二级吸附动力学能够更好地描述粉煤灰对水溶性混合染料的吸附过程. 染料在溶液中的外扩散系数均为 $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级, 染料在粉煤灰颗粒的内扩散系数为 $10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级. 根据 B_n 数, 水溶性染料在粉煤灰上的竞争吸附是外扩散控制的吸附过程.

关键词: 粉煤灰; 染料; 吸附动力学; 内扩散; 外扩散

中图分类号: X131.2; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2590-06 DOI: 10.13227/j.hjhx.2014.07.022

Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash

SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, FANG Long

(College of Chemical Science & Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The fly ash from coal combustion was used as adsorbent for the removal of binary mixtures of dyes from aqueous solution. The binary solution included reactive red 23 and one of reactive blue 4, reactive yellow 4, acid black 1 and acid blue 193. The experimental findings show the removal efficiency of reactive red 23 is about 60%-70% while the removal of acid dyes exceeds 90%. The removal value of reactive blue 4 is about 85%, while the value is only 50% for reactive yellow 4. The adsorption kinetic data are good fitted with the pseudo-second-order kinetic model. The external diffusion coefficient solution is in the order of $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, while the intraparticle diffusion coefficient is in the order of $10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Because all B_n numbers are smaller than 100, adsorption of dyes on fly ash is mainly controlled by the external diffusion mechanism.

Key words: fly ash; dyes; adsorption kinetics; intraparticle diffusion; external diffusion

印染废水含有大量染料, 即使在很低浓度下仍然使水具有较高色度, 排放到环境水体中能够减少阳光对水体穿透, 影响水生植物的光合作用^[1]; 并且很多染料对水体生物具有毒性^[2]. 大多数染料分子结构中含有芳环结构, 常用的污水生化处理方法对染料难以处理. 因此印染废水还需要进行氧化脱色、吸附脱色或膜处理脱色, 其中吸附脱色非常适合含有复杂结构的染料废水的处理^[3]. 很多研究者对吸附剂对单一染料废水的吸附特性进行了广泛研究^[4-7], 但是印染废水中通常含有多种染料, 吸附剂对混合染料吸附研究具有重要意义. 本研究采用来源广泛、价格低廉固体废弃物粉煤灰为吸附剂原料, 分析了经高温改性粉煤灰对水溶性阴离子染料混合溶液的竞争吸附动力学, 以期对吸附法的工业化应用提供理论基础.

1 材料与实验方法

1.1 实验仪器

SX-2 箱式电阻炉(上海羽通仪器仪表厂), 202 电热恒温干燥箱(金坛市华伟仪器厂), PHS-3C 酸

度计(上海精密仪器有限公司), UV-2102PC 紫外可见分光光度计(尤尼柯(上海)仪器有限公司).

1.2 实验材料及预处理

粉煤灰取自潍坊热电厂电除尘器飞灰, 化学组成如表 1 所示. 用于吸附研究的粉煤灰经筛分处理, 取 75 ~ 96 μm 粒径的粉煤灰, 此粒径区间颗粒的堆积密度为 $1.745 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 将筛分好的粉煤灰放入马弗炉中, 在 350 $^{\circ}\text{C}$ 焙烧处理 0.5 h, 进行高温改性. 改性后粉煤灰采用 JSM-6700F 场发射扫描电镜(JEOL)对颗粒表面进行分析, 采用 TRISTAR-3000 表面积分析仪(Micromeritics)测定比表面积及孔体积. 利用 pH 值漂移法对颗粒表面的电荷性能进行测定^[8].

所用阴离子染料为活性红 23(RR23)、活性蓝 4(RB4)、活性黄 4(RY4)、酸性黑 1(AB1)和酸性蓝 193(AB193), 其基本性质如表 2 所示, 所有染料使用前未经纯化处理.

收稿日期: 2013-09-21; 修订日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(21206080); 山东省博士后创新基金项目(201203027)

作者简介: 孙德帅(1976~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为清洁化工过程, E-mail: luckysds@163.com

表 1 粉煤灰的成分

Table 1 Composition of fly ash

| 项目 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | SO ₃ | 烧失量 |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----------------|------|
| 质量分数/% | 47.2 | 24.8 | 15.9 | 4.9 | 1.8 | 3.81 |

表 2 染料基本性能

Table 2 Characterization of dyes

| 项目 | 活性红 23 | 活性蓝 4 | 活性黄 4 | 酸性黑 1 | 酸性蓝 193 |
|----------------------------|--------|-------|-------|-------|---------|
| 相对分子质量 ¹⁾ | 679.4 | 620.4 | 567.3 | 570.5 | 836.8 |
| 化学结构 | 偶氮 | 蒽醌 | 偶氮 | 偶氮 | 偶氮 |
| λ_{\max}/nm | 532 | 600 | 389 | 614 | 602 |
| 磺酸基数量 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |

1) 相对分子质量计算不含钠离子

1.3 吸附实验

吸附实验采用间歇法进行,在烧杯中放入一定量粉煤灰,随后加入质量浓度为 1:1 配制的混合染料废水,置于搅拌器上,快速搅拌 15 min,放入恒温摇床(温度为 20℃ ± 1℃)以 120 r·min⁻¹ 速度摇动 120 min,适当时间取上层清液测定吸光度. 实验过程中染料溶液的初始 pH 值为 5.64 ~ 6.37,随着粉煤灰加入,溶液的 pH 值逐渐升高,吸附结束后残液的 pH 值为 5.96 ~ 7.28.

1.4 混合染液浓度测定

待测染液浓度测定采用双波长法^[9],以分光光度计分别在两种染料最大吸收波长 λ_1 与 λ_2 处测定混合染液的吸光度 A_1 与 A_2 ,根据式(1)计算待测染液质量浓度 c_1 与 c_2 ,其中 b 为比色皿厚度, k_{11} 与 k_{12} 为染料 1 在 λ_1 与 λ_2 处的吸收参数, k_{21} 与 k_{22} 为染料 2 在 λ_1 与 λ_2 处的吸收参数. 在实验 pH 值条件下,染料吸光度不受 pH 值影响.

$$c_1 = \frac{1}{b} \frac{k_{21}A_2 - k_{22}A_1}{k_{21}k_{12} - k_{22}k_{11}} \quad (1)$$

$$c_2 = \frac{1}{b} \frac{k_{12}A_1 - k_{11}A_2}{k_{21}k_{12} - k_{22}k_{11}} \quad (2)$$

1.5 染料脱色率测定

根据 1.4 节测定染料浓度,按式(2)计算其脱色率 R :

$$R\% = (c_0 - c) \times 100/c_0 \quad (2)$$

式中, c_0 为初始溶液中的染料质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), c 为吸附残液中的染料质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 粉煤灰的基本性能

取自电厂的粉煤灰置于马弗炉中进行高温改性,以提高粉煤灰的吸附^[10~12],改性后粉煤灰的表面孔隙结构会影响其对染料的吸附,图 1 给出了经过改性后粉煤灰的电镜照片,如图 1(a) 所示粉煤灰是由一些粒径不同的球形颗粒和部分无规则未燃尽碳颗粒组成^[13],而图 1(b) 为粉煤灰颗粒表面,从中可见颗粒表面有很多微小的孔隙,这些孔隙的存在为粉煤灰的吸附性能提供了可能. 通过液氮吸附实验测定高温改性后粉煤灰颗粒的比表面积为 9.84 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,孔体积为 0.023 $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. 通过 pH 值漂移法测定计算粉煤灰表面电荷为零时的 $\text{pH}_{\text{PZC}} = 8.40$.

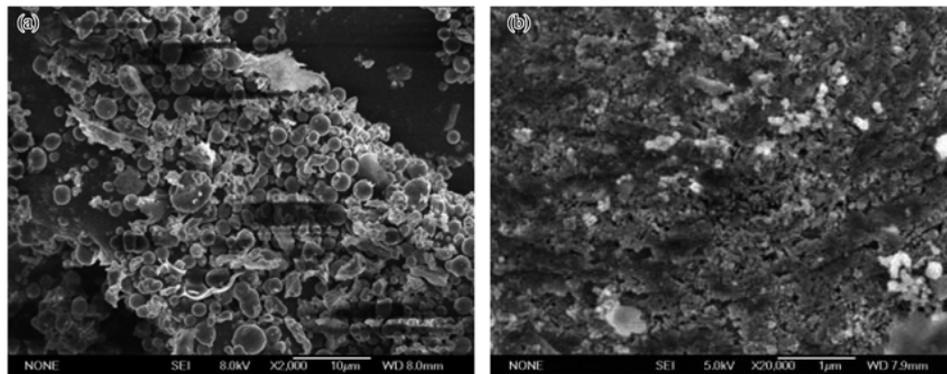


图 1 改性粉煤灰的 SEM

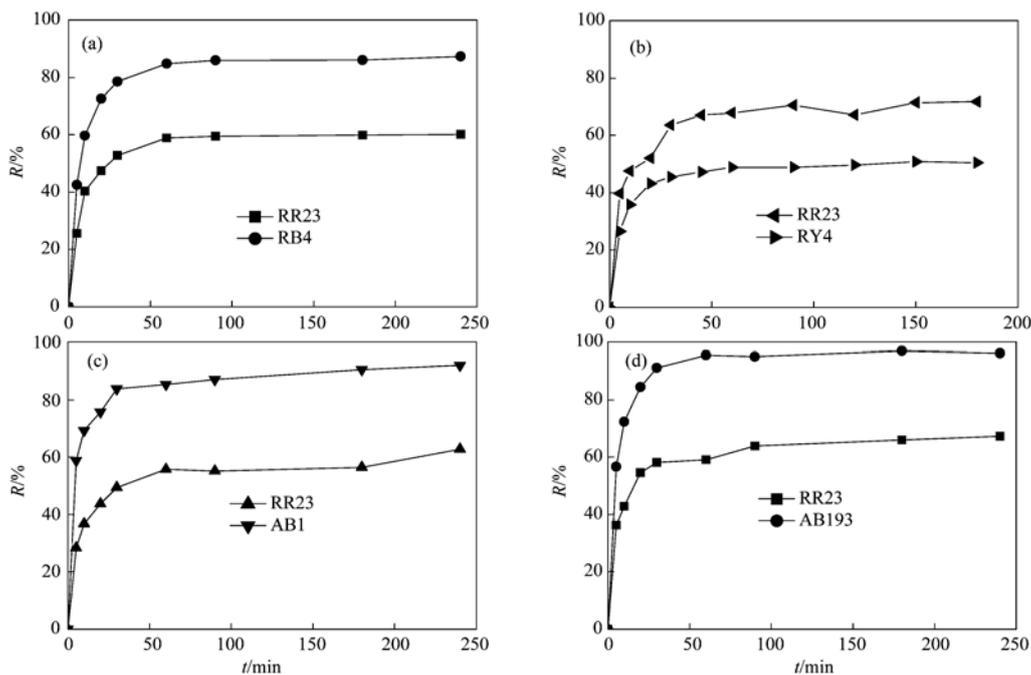
Fig. 1 SEM image of modified fly ash

因此当吸附溶液 pH 值低于 pH_{PZC} 时,粉煤灰颗粒表面带有正电荷,而当吸附溶液 pH 值高于 pH_{PZC} 时,粉煤灰颗粒表面带有负电荷. 在吸附实验条件下,染料分子由于电离作用,所用染料均带有负电荷,与粉煤灰颗粒表面的正电荷形成静电作用而达到被粉煤灰吸附的作用^[11,14].

2.2 粉煤灰对染料的吸附脱色

工业印染废水中常含有多种混合染料,实验

中采用粉煤灰对两种阴离子染料混合溶液进行脱色,结果如图 2 所示. 从中可见,在不同的混合体系中,活性红 23 的脱色率基本保持在 60% ~ 70%,体系中另外一种染料的脱色率则与染料的结构和应用类别有关,其中两个酸性染料的脱色率均超过 90%; 但活性染料则差别较大,活性蓝 4 的脱色率高达 85%, 而活性黄 4 的脱色率仅为 50%.



染料溶液总浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 粉煤灰投加量为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 下同

图 2 粉煤灰对混合染液的脱色

Fig. 2 Removal of complex dyes in solution on fly ash

2.3 粉煤灰对染料的吸附动力学研究

粉煤灰对染料的吸附速率与粉煤灰结构特点及染料特性均密切相关. 本研究对图 2 所示的吸附两个阶段的吸附数据,采用简单求导数 ($r = dc/dt$) 的方法计算吸附速率 (Origin 7.5 的微分计算), 根据计算结果吸附速率在 60 min 时出现数量级的变化, 因此将粉煤灰吸附分为快速阶段和慢速阶段, 在两个阶段的初始吸附速率计算结果如表 3 所示. 从中可见, 在快速吸附阶段的吸附速率高于慢速阶段吸附速率约两个数量级. 在活性染料/酸性染料体系中, 两个酸性染料在快速吸附阶段的吸附速率远高于活性染料, 这表明在粉煤灰优先吸附酸性染料. 在活性染料/活性染料体系中, 在快速吸附阶段的速率则与染料的结构有关.

为进一步分析粉煤灰对水溶性混合竞争吸附过程, 采用准一级吸附动力学模型、准二级吸附动力

表 3 粉煤灰对染料在快速和慢速阶段的初始吸附速率/ $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$

Table 3 Initial adsorption rate at the rapid and slow stages/ $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$

| 项目 | r_{Rapid} | r_{Slow} |
|------------|--------------------|-------------------|
| RR23/RB4 | 2.56/4.25 | 0.055/0.061 |
| RR23/RY4 | 3.97/2.65 | 0.036/0.027 |
| RR23/AB1 | 2.83/5.89 | 0.048/0.028 |
| RR23/AB193 | 3.72/5.84 | 0.052/0.034 |

学模型对数据分别进行处理, 以期得到对样品吸附行为为最合适的描述. 准一级模型和准二级模型可以分别采用方程 (3) 和 (4) 表示^[15,16].

$$q = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

$$q = \frac{k_2 q_e t}{1 + k_2 t} \quad (4)$$

式中, q 为染料在粉煤灰上的吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); q_e 为

平衡态吸附量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); k_1 为准一级吸附速率常数 (min^{-1}); k_2 为准二级吸附速率常数 [$\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$]; t 为吸附时间(min). 图 3 给出了实验中的吸附数据及由 Origin 7.5 直接非线性拟合给出的准一级和准二级吸附曲线, 拟合参数及决定系数(R^2)如表 4 所示. 从中所见, 在不同的吸附体系中准二级吸附拟合过程的相关系数均高于准一级吸附的值, 由此可以判断准二级吸附动力学能够更好地描述粉煤灰对水溶性混合染料的吸附过程. 根据表 4

中计算的理论平衡吸附量可知, RR23 的吸附量在 $1.212 \sim 1.456 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 粉煤灰对混合体系的总吸附量在 $2.497 \sim 3.147 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 在前期的研究中粉煤灰对单一 RR23 染料的吸附值为 $2.110 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[13], 因此可以发现随着第二种染料的加入, 竞争吸附的存在使 RR23 的吸附量减少, 但总吸附量却随之增加. 粉煤灰对 RR23/AB193 体系的总吸附量最高, 而对 RR23/Ry4 体系的总吸附量最少, 因此在吸附过程中染料结构和粉煤灰结构均会影响吸附动力学.

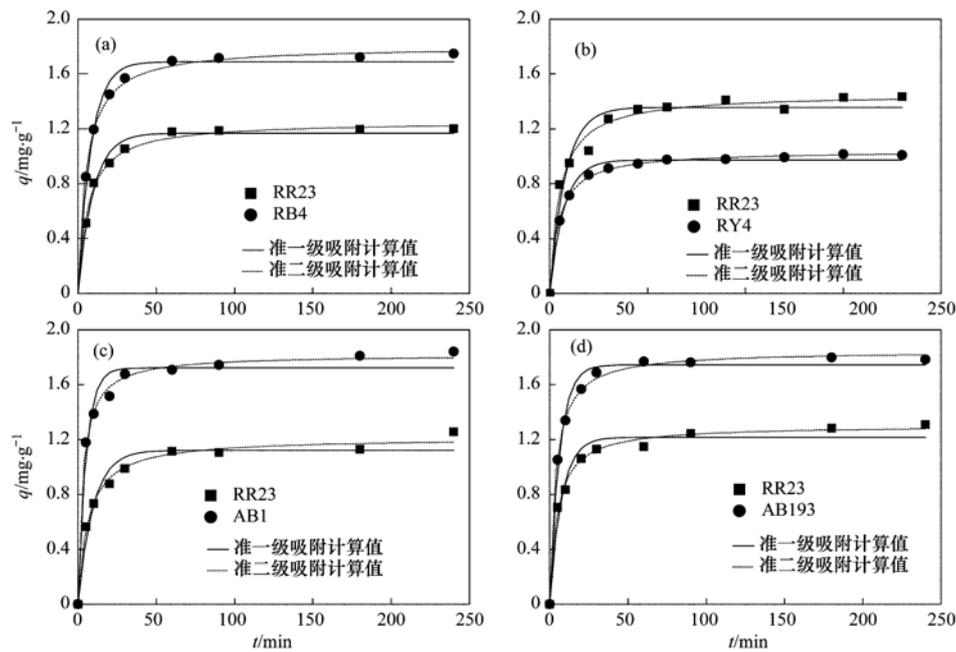


图 3 粉煤灰对混合染料吸附动力学

Fig. 3 Adsorption kinetics of complex dyes in solution on fly ash

表 4 粉煤灰吸附动力学参数

Table 4 Kinetic parameters of adsorption on fly ash

| 项目 | 准一级吸附 | | | 准二级吸附 | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------------|--|-------------|
| | $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | k_1/min^{-1} | R^2 | $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | $k_2/\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$ | R^2 |
| RR23/RB4 | 1.169/1.689 | 0.105/0.123 | 0.988/0.990 | 1.254/1.803 | 0.159/0.193 | 0.997/0.998 |
| RR23/Ry4 | 1.357/0.974 | 0.126/0.137 | 0.953/0.988 | 1.456/1.041 | 0.200/0.219 | 0.986/0.999 |
| RR23/AB1 | 1.122/1.721 | 0.103/0.195 | 0.960/0.972 | 1.212/1.819 | 0.155/0.335 | 0.990/0.996 |
| RR23/AB193 | 1.744/1.216 | 0.160/0.133 | 0.989/0.968 | 1.303/1.846 | 0.273/0.208 | 0.998/0.993 |

Kumar 等^[21]的研究表明若对吸附数据进行孔道扩散吸附拟合如式(5), 得到多线性曲线表明吸附过程受多步控制.

$$q = k_3 t^{0.5} \quad (5)$$

式中, k_3 为孔道内扩散速率常数 [$\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min}^{0.5})^{-1}$]. 本研究对粉煤灰吸附数据进行拟合, 结果如图 4 所示. 从中可见, 粉煤灰对所有体系的吸附过程均可以分为两段线性方程, 即初始的快速扩散和随后缓慢内扩散过程, 该结果与理论分析是一

致的.

为找出外扩散和内扩散对扩散传质速率的控速步骤, 对外扩散与内扩散系数进行分析计算. 外扩散理论认为在粉煤灰加入体系的初始阶段, 染料在粉煤灰颗粒内孔道的浓度趋近于零, 染料在孔道内扩散可以忽略, 此时外扩散可以根据式(6)计算^[21,22]:

$$-\frac{dc}{dt} = k_f \frac{3m}{\rho d} (c - c_e) \quad (6)$$

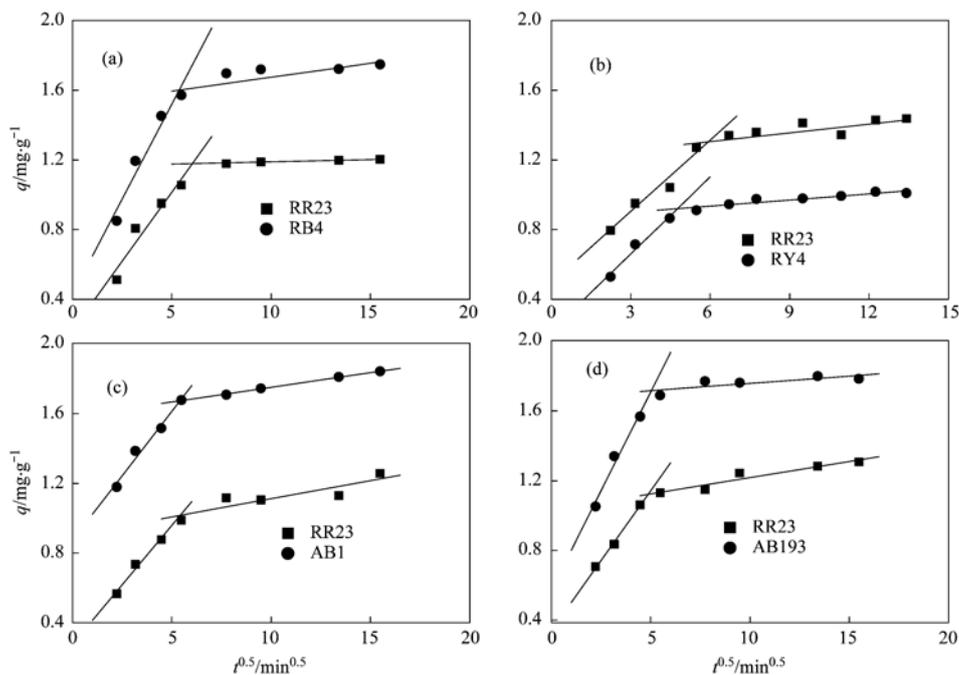


图 4 粉煤灰对混合染液的孔道扩散动力学拟合

Fig. 4 Fitting curve of the intraparticle diffusion model

式中, k_f 为外扩散系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); m 为吸附剂的质量 (g); ρ 为吸附剂颗粒的表观密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); d 为吸附剂的颗粒直径 (m). 使用边界条件 (当 $t = 0$ 时, $c = c_0$; $c_e = 0$) 可以求得式 (7):

$$\left[\frac{dc}{dt} \right]_{t=0} = -k_f \frac{3m}{\rho d} \quad (7)$$

利用 Origin 7.5 的微分计算求得染料在粉煤灰颗粒的外扩散系数, 如表 5 所示. 从中可见, 在不同染料体系中, 染料在溶液中的外扩散系数均为 $10^{-4} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级, 这与其他研究者的结论^[21,23]是一致的.

Khraisheh 等^[24]利用式 (8) 对内扩散系数进行理论计算.

$$-\lg \left[1 - \left(\frac{q}{q_e} \right)^2 \right] = \frac{4\pi D}{2.3d^2} t \quad (8)$$

式中, D 为孔道内扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). 表 5 给出了内扩散系数计算结果. 从中可知无论是外扩散还是内扩散, 酸性染料的扩散系数显著高于活性染料的扩散系数. 根据已经计算而得的外扩散系数和内扩散系数, 可以计算 B_N 数 (式 9)^[25-27]:

$$B_N = k_f \frac{d}{2D} \quad (9)$$

通常 B_N 数高于 100 时, 内扩散为吸附控速步骤, 而当 B_N 数低于 100 时, 吸附为外扩散控制过程. 计算结果如表 5 所示, 所有染料吸附过程的 B_N 数均小于 100, 显然水溶性染料在粉煤灰上的竞争吸附是以外扩散为主要控制的吸附过程.

表 5 粉煤灰吸附扩散系数

Table 5 Diffusion coefficients of adsorption on fly ash

| 项目 | 外扩散 $k_f \times 10^4 / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | 孔道内扩散 | | B_N |
|------------|--|---|-------------|-----------|
| | | $D \times 10^8 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ | R^2 | |
| RR23/RB4 | 1.78/2.96 | 1.63/1.53 | 0.986/0.982 | 46.4/82.2 |
| RR23/RY4 | 2.75/1.84 | 1.72/1.65 | 0.987/0.983 | 68.1/47.2 |
| RR23/AB1 | 1.96/4.08 | 1.24/2.17 | 0.994/0.981 | 67.2/79.8 |
| RR23/AB193 | 2.52/3.94 | 1.76/2.22 | 0.992/0.992 | 61.0/75.4 |

3 结论

(1) 在不同的混合体系中, 活性红 23 的脱色率

基本保持在 60% ~ 70%, 体系中酸性染料的脱色率均超过 90%; 活性蓝 4 的脱色率高达 85%; 而活性黄 4 的脱色率仅为 50%. 准二级吸附动力学能够很

好地描述粉煤灰对水溶性混合染料的吸附过程。

(2) 在不同染料体系中, 染料在溶液中的外扩散系数均为 $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级, 染料在粉煤灰颗粒的内扩散系数为 $10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级。酸性染料的扩散系数显著高于活性染料的扩散系数。水溶性染料在粉煤灰上的竞争吸附是以外扩散控制为主要控制步骤的吸附过程。

参考文献:

- [1] Al-Degs Y S, El-Barghouthi M I, Khraishah M A, *et al.* Effect of surface area, micropores, secondary micropores and mesopores volumes of activated carbons on reactive dyes adsorption from solution [J]. *Separation Science and Technology*, 2004, **39** (1): 97-111.
- [2] Wang S B, Boyjoo Y, Choueib A, *et al.* Removal of dyes from solution using fly ash and red mud [J]. *Water Research*, 2005, **39**(1): 129-138.
- [3] Calvete T, Lima E C, Cardoso N F, *et al.* Application of carbon adsorbents prepared from Brazilian-pine fruit shell for the removal of reactive orange 16 from aqueous solution; Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(8): 1695-1706.
- [4] 张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 等. 壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1815-1820.
- [5] Sathishkumar P, Arulkumar M, Palvannan T. Utilization of agro-industrial waste *Jatropha curcas* pods as an activated carbon for the adsorption of reactive dye remazol brilliant blue R (RBBR) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, **22**(1): 67-75.
- [6] 徐仁扣, 赵安珍, 肖双成, 等. 农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 142-146.
- [7] 廉菲, 刘畅, 李国光, 等. 高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 147-155.
- [8] Fariaa P C C, Örfão J J M, Pereira M F R. Adsorption of anionic and cationic dyes on activated carbons with different surface chemistries [J]. *Water Research*, 2004, **38**(8): 2043-2052.
- [9] Porter J F, McKay G, Choy K H. The prediction of sorption from a binary mixture of acidic dyes using single- and mixed-isotherm variants of the ideal adsorbed solute theory [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, **54**(24): 5863-5885.
- [10] 孙德帅, 江峰, 刘馨. 粉煤灰对活性染料的脱色研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2009, (5): 26-28.
- [11] 刘守新, 陈曦, 张显权. 活性炭孔结构和表面化学性质对吸附硝基苯的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1192-1196.
- [12] Hsu T C. Adsorption of an acid dye onto coal fly ash [J]. *Fuel*, 2008, **87**(13-14): 3040-3045.
- [13] Sun D S, Zhang X D, Wu Y D, *et al.* Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 335-342.
- [14] Bulut E, Özacar M, Şengil İ A. Equilibrium and kinetic data and process design for adsorption of congo red onto bentonite [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 613-622.
- [15] Pengthamkeerati P, Satapanajaru T, Singchan O. Sorption of reactive dye from aqueous solution on biomass fly ash [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **153** (3): 1149-1156.
- [16] Srivastava V C, Swamyl M M, Mall I D, *et al.* Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: equilibrium, kinetics and thermodynamics [J]. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, **272**(1-2): 89-104.
- [17] Keith K H C, Danny C K K, Chun W C, *et al.* Film and intraparticle mass transfer during the adsorption of metal ions onto bone char [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, **271**(2): 284-295.
- [18] Wang S B, Li H T. Kinetic modeling and mechanism of dye adsorption on unburned carbon [J]. *Dyes and Pigments*, 2007, **72**(3): 308-314.
- [19] 岳钦艳, 解建坤, 高宝玉, 等. 污泥活性炭对染料的吸附动力学研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(9): 1431-1438.
- [20] Ghaedi M, Mosallanejad N. Study of competitive adsorption of malachite green and sunset yellow dyes on cadmium hydroxide nanowires loaded on activated carbon [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, **20**(3): 1085-1096.
- [21] Kumar K V, Porkodi K. Mass transfer, kinetics and equilibrium studies for the biosorption of methylene blue using *Paspalum notatum* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **146**(1-2): 214-226.
- [22] Apiratikul R, Madacha V, Pavasant P. Kinetic and mass transfer analyses of metal biosorption by *Caulerpa lentillifera* [J]. *Desalination*, 2011, **278**(1-3): 303-311.
- [23] Al-Qodah Z. Adsorption of dyes using shale oil ash [J]. *Water Research*, 2000, **34**(17): 4295-4303.
- [24] Khraishah M A M, Al-Degs Y S, Allen S J, *et al.* Elucidation of controlling steps of reactive dye adsorption on activated carbon [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, **41** (6): 1651-1657.
- [25] Dizge N, Aydiner C, Demirbas E, *et al.* Adsorption of reactive dyes from aqueous solutions by fly ash: kinetic and equilibrium studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **150** (3): 737-746.
- [26] Queka S Y, Al-Duri B. Application of film-pore diffusion model for the adsorption of metal ions on coir in a fixed-bed column [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2007, **46**(5): 477-485.
- [27] Stavropoulos G G. A fundamental approach in liquid phase adsorption kinetics [J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, **92** (10): 2123-2126.

CONTENTS

| | | |
|---|---|--------|
| Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes | ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i> | (2439) |
| <i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station | YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i> | (2449) |
| Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province | FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i> | (2454) |
| Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer | DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> | (2460) |
| Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods | CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i> | (2468) |
| Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China | WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> | (2477) |
| Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area | LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i> | (2483) |
| Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing | PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> | (2490) |
| Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo | LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i> | (2497) |
| Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry | WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i> | (2503) |
| Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent | XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i> | (2508) |
| Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China | SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i> | (2515) |
| Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012 | XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen | (2520) |
| Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu | WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i> | (2528) |
| Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors | YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i> | (2539) |
| Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer | HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> | (2547) |
| Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake | LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i> | (2557) |
| Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes | WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i> | (2565) |
| Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method | JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> | (2572) |
| Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment | CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> | (2579) |
| Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides | WANG Hong-yu, LIU Yan | (2585) |
| Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash | SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> | (2590) |
| Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites | WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i> | (2596) |
| Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption | TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i> | (2604) |
| Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism | LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> | (2612) |
| Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment | ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i> | (2620) |
| Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol | MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i> | (2627) |
| Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron | WANG Meng-yue, MA Lu-ming | (2633) |
| Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification | LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> | (2639) |
| Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill | QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> | (2645) |
| Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying | WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> | (2650) |
| New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System | LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i> | (2658) |
| Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas | GUO Xue, BI Chun-tuan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> | (2664) |
| Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China | JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i> | (2672) |
| Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau | XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang | (2680) |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China | HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i> | (2691) |
| Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas | ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i> | (2698) |
| Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay | LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i> | (2705) |
| Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City | WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu | (2714) |
| Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish | LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> | (2721) |
| Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China | HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i> | (2728) |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City | ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i> | (2736) |
| Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions | BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i> | (2742) |
| Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils | WANG Hui, XIE Xin-yuan | (2748) |
| Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i> | LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i> | (2755) |
| Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium | CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i> | (2762) |
| Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season | PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> | (2771) |
| Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei | JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke | (2777) |
| Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box | WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun | (2785) |
| Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell | MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> | (2791) |
| Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile | ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i> | (2798) |
| Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter | DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i> | (2807) |
| Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages | HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i> | (2816) |
| Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation | WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i> | (2822) |
| Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China | MA Lan, MAO Jian-su | (2829) |
| Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation | ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin | (2834) |

《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7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 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