

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O₃来源识别 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)

厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)

近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)

稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)

气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H₂)浓度 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)

小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO₂特征及扩散通量 张永领, 杨小林, 张东(40)

夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)

基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)

温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)

人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)

太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)

鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)

影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)

水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)

蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)

汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)

三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)

三峡库区农林畜复合小流域水体汞的时空变化特征 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)

环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)

三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)

舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)

太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)

厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)

两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)

大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)

铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)

铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)

一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)

磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)

腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)

降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)

FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)

微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)

微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)

舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)

四川凉山彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)

铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)

外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)

厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)

洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)

不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)

畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)

华南某市生活垃圾组成特征分析 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)

生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)

基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)

一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)

典型黄土区油松树干液流变化特征分析 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)

利用巨藻发酵联产氢气与挥发性有机酸的研究 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)

人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 李曼璐, 姜玥璐(365)

《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236,243,273,300)

一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究

吴亦潇¹, 李爱民², 汪的华¹, 张维昊^{1*}

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072; 2. 湖北省环境监测中心站, 武汉 430072)

摘要: 研究了一种新型纳米级不定形碳对水中四环素的吸附作用. 结果表明, 在 Li-Na-K 碳酸盐的共熔体系中生成的碳粉对四环素表现出了良好的吸附性能. 在 298K 下, 碳粉对四环素的吸附行为更符合拟二级动力学模型和 Freundlich 吸附等温线, 最大吸附容量达到 127.76 mg·g⁻¹. 热力学计算结果表明, 吸附过程是吸热的、自发的, 以化学吸附为主. 吸附行为表现出明显的 pH 依赖性, 当溶液的起始 pH 在 2~11, pH 为 4 时碳粉对四环素的吸附量最大. 溶液中的阳离子对吸附有一定的影响, 但影响不大, 随着阳离子浓度的增加, 吸附量在一定程度上逐渐减小. 离子交换作用可能是吸附的原理之一, 还可能同时存在静电引力、氢键等作用. 分别使用 0.25 mol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 和 NaCl 溶液进行解吸实验, 解吸效率在 7.42%~25%, 解吸效率较低, 说明吸附的化学作用较强.

关键词: 纳米材料; 不定形碳; 四环素; 吸附; 解吸

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0215-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.028

Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon

WU Yi-xiao¹, LI Ai-min², WANG Di-hua¹, ZHANG Wei-hao^{1*}

(1. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Environmental Monitoring Central Station, Wuhan 430072, China)

Abstract: The experiments were conducted to investigate the adsorption behavior of tetracycline on a kind of nano-sized amorphous carbon, which was synthesized in a molten salt electrochemical system, comprising a eutectic mixture of Li-Na-K carbonates. The results showed that, the carbon powder had a good adsorption performance. At 298K, the maximum adsorption capacity of tetracycline was 127.76 mg·g⁻¹. The adsorption data could be well fitted by the pseudo-second-order model and the Freundlich isotherm. Also, the thermodynamic tests for the adsorption were conducted. The adsorption was endothermic and spontaneous reaction with chemical bond as the dominant. The adsorption was pH dependent. The adsorption capacity reached the maximum when solution pH was 4 in the range from 2 to 11. The existence of cations had little effects on the adsorption. The adsorption capacity increased with the concentration of cations to a certain extent. Ion exchange may be one of the adsorption mechanisms, as well as, electric attraction and hydrogen bond. Moreover, desorption experiments were carried out in 0.25 mol·L⁻¹ CaCl₂ or NaCl solution respectively. Desorption efficiency ranged from 7.42% to 25%, which was at a relatively low level. The result indicated that the chemical adsorption process was strong.

Key words: nano materials; amorphous carbon; tetracycline; adsorption; desorption

四环素类抗生素是由放线菌产生的一类抗生素, 包括金霉素、土霉素、四环素及一些半合成衍生物等. 其中, 由于四环素(TC)对革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、立克次氏体和衣原体等微生物均可发挥作用, 具有广谱抗菌性和良好的治疗效果^[1], 因此被广泛应用于预防和治疗人类、动物和植物的疾病, 同时在畜牧业中做为饲料添加剂促进生长^[2]. 在生物代谢过程中, 绝大部分四环素都通过粪便和尿液直接排出体外^[3], 最终进入到水环境中, 对水生生态系统造成危害, 同时诱导环境中抗性基因的产生, 造成持续性的污染^[4]. 目前, 四环素在自来水、饮用水、地表水等环境介质中均有检出, 浓度集中在 ng·L⁻¹~μg·L⁻¹^[5-7].

吸附法由于具有高效、无副产物等特点, 在水中四环素的去除方面得到了广泛的应用. 目前研究

的材料包括石墨烯^[8]、氧化铝^[9]、单壁和多壁碳纳米管^[10]、沸石^[11]、活性炭^[12]等. 纳米级碳基材料具有大的比表面积和丰富的孔隙结构, 已经被证实能够快速、高效地去除水中的四环素^[13]. 碳纳米材料中的石墨烯和碳纳米管由于其独特的结构和良好的吸附性能是近年来研究的热点. 它们的制备方法主要包括石墨电弧法、热解法、氧化还原法^[14]等, 这些生产方法成本高、能耗大, 难以大量生产应用于实际, 限制了碳纳米材料的发展. Yin等^[15]使用电化学方法, 在 Li-Na-K 碳酸盐的共熔体系中捕集

收稿日期: 2014-04-30; 修订日期: 2014-08-02

基金项目: 环境基准与风险评估国家重点实验室开放课题项目(SKLECR20130FP10); 湖北省环境保护厅环境保护科研项目(2014HB08)

作者简介: 吴亦潇(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境有机污染物的监测和处理, E-mail: yixiaowu@whu.edu.cn
* 通讯联系人, E-mail: zhangwh@whu.edu.cn

CO₂,生成一种纳米级的不定形碳粉.该方法具有生产成本低、能耗小、生产过程简单等优点,同时在生成过程中没有有毒有害物质产生,是一种环境友好型的材料合成方法.通过前期的研究可知,碳粉呈雾状,具有很大的比表面积(616 m²·g⁻¹),同时通过 Zeta 电位分析,当溶液 pH 值大于 2 时,表面带有负电荷,是十分理想的吸附材料.

本研究测试了该碳粉对水中四环素的吸附性能,并结合吸附剂和吸附质的特性讨论吸附机制.

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 材料

供试碳粉由 Yin 等提供,吸附剂的具体表征及参数见文献[15].

四环素:购自 Solarbio 公司,其分子式为 C₂₂H₂₄N₂O₈·HCl,纯度≥98%;乙腈(色谱纯)、乙酸铵(色谱纯,≥99.0%):购自 Sigma-Aldrich 公司;其他化学试剂均为分析纯;实验用水均为去离子水.

1.1.2 仪器

1290 超高效液相色谱与 6460 QQQ 质谱联用仪(Agilent,美国),SHA-B 水浴恒温振荡器(上海比朗仪器有限公司),FE20 pH 计(METTLER TOLEDO,瑞士).

1.2 实验方法

通过预实验可知碳粉对四环素的吸附在 17 h 内可达到平衡,溶液初始 pH 值为 4 时,吸附量最大.每组实验均设置碳粉和四环素溶液空白,及两个平行样.由于在制作过程中碳粉的产量较少,同时预实验结果显示同样条件下碳粉的用量在 2 mg 时吸附量最大.因此,每组实验都使用分析天平准确称量 2 mg 碳粉于 100 mL 锥形瓶中,加入一定浓度的四环素溶液 50 mL,聚四氟乙烯膜封口,于水浴恒温振荡器中 160 r·min⁻¹ 振荡平衡 17 h.

1.2.1 吸附动力学

四环素溶液浓度为 6 mg·L⁻¹,温度为(25 ± 0.5)℃.分别在 0、1、2、4、8、16、32、64、128、256、512 和 1 024 min 取样 2 mL,经 0.22 μm 混合纤维素酯滤膜过滤后,测定滤液中四环素的浓度.

1.2.2 吸附等温线

四环素溶液起始浓度范围 1 ~ 80 mg·L⁻¹,振荡平衡 17 h 后,取样测定,其它实验操作同 1.2.1 节.

1.2.3 pH 和离子强度对吸附的影响

测定 pH 对吸附的影响时,体系的 pH 范围 2 ~

11,此时体系中无外加阳离子.测定离子强度对吸附影响时,Ca(Na)离子浓度范围 0 ~ 0.5 mol·L⁻¹,此时体系 pH 为 4,振荡平衡 17 h 后,取样测定,其它实验操作同 1.2.1 节.

1.2.4 解吸实验

当体系中吸附达到平衡后,溶液立即过 0.45 μm 的滤膜.使用等量的去离子水多次冲洗滤膜,将膜上的碳粉转入 100 mL 锥形瓶中,分别加入 50 mL 0.25 mol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 和 NaCl 溶液.25℃ 下,振荡平衡 20 h 后,取样测定.

1.2.5 吸附量的计算

碳粉吸附四环素达到吸附平衡时的吸附量(q_e , mg·g⁻¹)使用以下公式进行计算:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (1)$$

式中, c_0 和 c_e 分别是四环素起始和平衡时的浓度(mg·L⁻¹), m 是吸附剂的质量(g), V 是溶液的体积(L),以吸附达到平衡后溶液实际剩余体积计.

1.3 分析方法

液相色谱条件: Eclipse Plus-C18 色谱柱(100 mm × 2.1 mm, 1.8 μm, Agilent),柱温 40℃,进样体积 10 μL,采用 0.2% 甲酸 2 mmol·L⁻¹ 乙酸铵水溶液和乙腈做为流动相,流动相配比为 75:25,流速 0.3 mL·min⁻¹.

质谱条件:电喷雾电离源(ESI)正离子方式,选择 MRM 模式,干燥气温度 325℃,流量 5 L·min⁻¹,鞘气温度 350℃,流量 11 L·min⁻¹.四环素的母离子和子离子的质荷比分别为 445 和 410.1,碰撞电压 130 V,碰撞能 15 eV.

2 结果与讨论

2.1 碳粉对四环素的吸附动力学

为了阐述吸附的过程,分别将实验结果拟合了拟一级动力学模型、拟二级动力学模型和颗粒内扩散模型(图 1~3).计算公式如下:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

$$q_t = k_i t^{0.5} + X \quad (4)$$

式中, k_1 (h⁻¹), k_2 [g·(mg·h)⁻¹] 和 k_i [g·(mg·h^{0.5})⁻¹] 分别是拟一级动力学模型、拟二级动力学模型和颗粒内扩散模型的速率常数; q_t (mg·g⁻¹) 是 t 时刻四环素在碳粉上的吸附量; X 是截距,反映了边界层厚度.

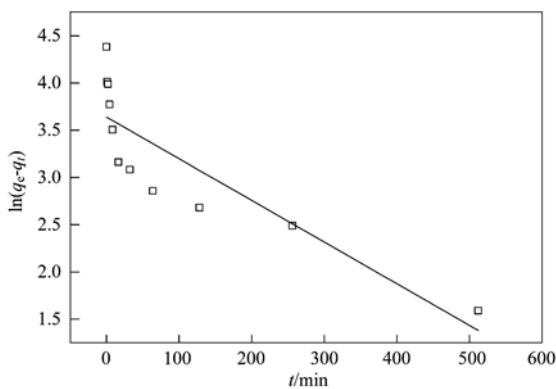


图1 碳粉吸附四环素的拟一级动力学模型
Fig. 1 Pseudo-first-order model of tetracycline adsorption to carbon powder

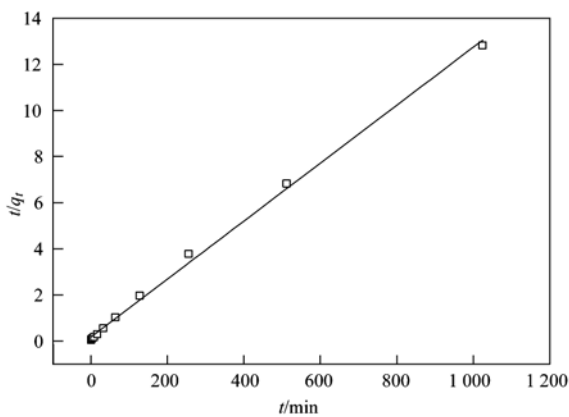


图2 碳粉吸附四环素的拟二级动力学模型
Fig. 2 Pseudo-second-order model of tetracycline adsorption to carbon powder

拟一级动力学模型和拟二级动力学模型分别描述了与吸附容量有关的单因子和多因子控制下的吸附. 颗粒内扩散模型用来确定吸附的限速过程^[16].

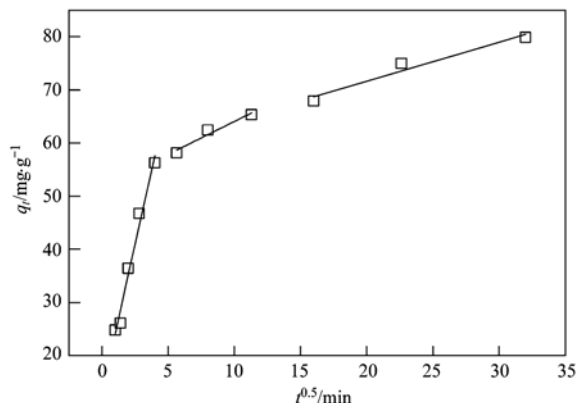


图3 碳粉对四环素吸附的颗粒内扩散模型
Fig. 3 Intra particle diffusion model of tetracycline adsorption to carbon powder

由表1可知,拟二级动力学方程能够更好地拟合吸附的过程, R^2 达到0.9976,同时根据公式计算得到的平衡时碳粉对四环素的吸附量更加符合实验测定的结果. 有研究指出,当吸附过程符合拟二级动力学方程时,说明吸附主要受化学作用所控制^[17].

碳粉对四环素吸附过程可分3个阶段. 第一阶段为碳粉表面的吸附,第二阶段为颗粒内快速扩散过程,第三阶段边界层效应增大,颗粒内扩散缓慢. 图3也明显呈现了吸附的3个阶段. 同时,图形没

表1 碳粉对四环素吸附的吸附动力学模型常数及相关系数

Table 1 Parameters of kinetic models for tetracycline adsorption to carbon powder

项目	$c_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$q_{e,\text{exp}}/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	拟一级动力学模型			拟二级动力学模型		
			$k_1 \times 10^{-2}$	$q_{e,\text{cal}}/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2	$k_2 \times 10^{-2}$	$q_{e,\text{cal}}/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2
TC	6	79.85	0.44	37.96	0.7228	0.09172	79.3651	0.9976

有过原点,说明颗粒内扩散不是限制吸附速率的步骤,因此,在吸附开始的时候膜扩散或化学反应可能控制吸附的速率.

2.2 碳粉对四环素的吸附等温线

在298K下进行了吸附等温线的测定. 为了阐明碳粉对四环素的吸附特性,分别拟合了Freundlich和Langmuir方程(图4):

$$q_e = K_F c_e^{1/n} \quad (5)$$

表2 碳粉对四环素吸附的吸附等温线模型常数及相关系数

Table 2 Parameters of the Freundlich and Langmuir equations for tetracycline adsorption to carbon powder

项目	T/K	Freundlich 方程			Langmuir 方程		
		K_F	$1/n$	R^2	K_L	$q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2
TC	298	56.51	0.22	0.9588	0.09172	127.76	0.7846

$$q_e = \frac{Q_m K_L c_e}{1 + K_L c_e} \quad (6)$$

式中, $K_F [\text{mg}^{-1/n} \cdot (\text{L}^{1/n} \cdot \text{g}^{-1})]$ 是与吸附量有关的Freundlich常数, $K_L (\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$ 是与吸附能有关的Langmuir平衡常数, n 是与吸附强度有关的常数, $Q_m (\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$ 是最大吸附量.

由表2可知,与Langmuir吸附等温模型相比, Freundlich吸附等温模型可以更好地描述碳粉对四

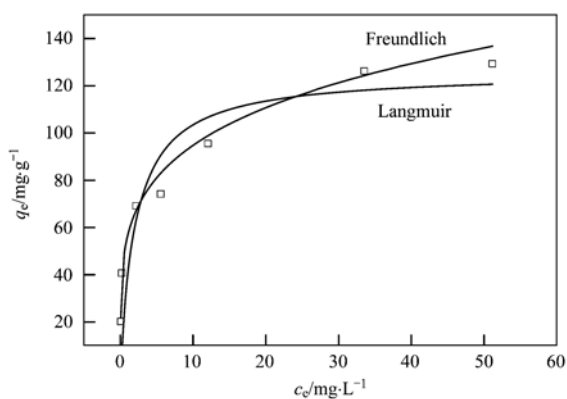


图4 碳粉对四环素吸附的吸附等温线模型

Fig. 4 Adsorption isotherms of tetracycline to carbon powder

环素的等温吸附行为. Freundlich 模型参数 $1/n$ 介于 $0 \sim 1$ 之间,表明碳粉对四环素的吸附过程属于优惠吸附^[18]. Langmuir 模型还计算出了碳粉对四环素的最大吸附量 Q_m ,反映吸附能力的大小,值越大,吸附能力也越大^[19]. 如表3所示,与其他吸附剂相比,碳粉在较低的温度下就具有更高的吸附量,对四环素表现出了良好的吸附性能.

表3 不同吸附剂对四环素的吸附性能比较¹⁾

Table 3 Comparison of different adsorption performances for tetracycline

吸附剂	最大吸附量 /mg·g ⁻¹	温度/K	文献
磁性多孔碳	25.44	303	[16]
竹炭	22.4	303	[20]
氧化石墨烯	39.1	303	[13]
磁性埃洛石复合材料	38.17	308	[21]
活性污泥	70.95	298	[22]
改性纳米 Fe ₃ O ₄	61.23	313	[23]
纳米级不定形碳粉	127.76	298	本研究

1)最大吸附量由 Langmuir 模型计算得到;温度为模拟 Langmuir 模型时的温度

Langmuir 等温模型参数 R_L 可以表述为:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L c_0} \quad (7)$$

经计算,Langmuir 模型参数 R_L 值(四环素初始浓度 $1 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,碳粉对四环素的 R_L 值介于 $0.19 \sim 0.93$ 之间)均在 $0 \sim 1$ 之间,进一步说明了该吸附是优惠吸附.

2.3 吸附热力学

为了测定温度对吸附的影响,分别在 $293 \sim 308 \text{ K}$ 下进行吸附实验. 吸附过程中热力学参数的变化通过以下方程进行计算:

$$K_d = \frac{q_e}{c_e} \quad (8)$$

$$\ln K_d = \frac{-\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (9)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (10)$$

式中, K_d 是分配系数, ΔH^0 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 是焓变, ΔS^0 [$\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$] 是熵变, ΔG^0 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 是吉布斯自由能的变化, T (K) 为热力学温度, R 为气体常数 [$8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$].

ΔH^0 是正值,表明吸附是一个吸热过程,实验结果也显示随着温度的升高碳粉对四环素的吸附容量逐渐增加. 如表4所示,随着温度的升高, ΔG^0 逐渐降低,说明较高的温度对吸附有利. ΔG^0 是吸附驱动力的体现,为负值,说明碳粉吸附四环素是自发的. ΔH^0 值在 $50 \sim 65 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 之间,属于化学吸附范围,说明吸附的作用以化学作用为主^[24].

表4 碳粉对四环素吸附的热力学相关参数

Table 4 Thermodynamic parameters for tetracycline to carbon powder			
T/K	$\Delta G^0/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta H^0/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta S^0/\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$
293	-13.074 7		
298	-14.191 7	52.380 7	223.397 2
303	-15.308 7		
308	-16.425 6		

2.4 溶液初始 pH 值对碳粉吸附四环素的影响

在反应液初始 pH 值为 $2 \sim 11$ 条件下考察了碳粉吸附四环素的行为,结果如图5所示. 当 pH 值介于 $2 \sim 4$ 之间时,碳粉对四环素的吸附量随着 pH 值的升高而升高,而当 pH 值大于 4,碳粉对四环素的吸附量则随着 pH 值的升高而降低. 溶液在酸性较强时吸附能力最强. 这与四环素的性质有关. 由于四环素带有氨基、羧基、苯酚、醇、酮等有极性、可电离的官能团,四环素在不同 pH 值下形态不同. 四环素有 3 个酸解常数,分别是 3.3、7.7、9.7^[8]. 因此,当溶液 pH 值小于 3.3 时,四环素溶液以 H_4TC^+ 离子占主导;当 pH 值在 3.4 和 7.7 之间时,四环素溶液以 H_3TC 形态占主导;当 pH 值在 7.7 和 9.7 之间时,四环素溶液以 H_2TC^- 形态占主导;当溶液 pH 值大于 9.7 时,四环素溶液以 HTC^{2-} 占主导. 当溶液中酸性较强时,四环素分子上的阳离子基团可以通过阳离子交换或静电引力的方式与碳粉表面的负电荷结合而产生吸附作用. 但当 pH 值过低 (< 4) 时,过多的 H^+ 的竞争作用,反而降低了四环素的吸附作用^[25]. 当溶液中 pH 值为中性到弱碱性时,吸附量呈上升趋势,说明碳粉对中性离子也有一定的吸附作用. 由于中性离子相对于质子化的离子有更大的疏水性,可通过疏水作用与碳粉上的

疏水位点相结合.同时,四环素分子中含有许多含氧官能团,还可能通过氢键与碳粉结合.

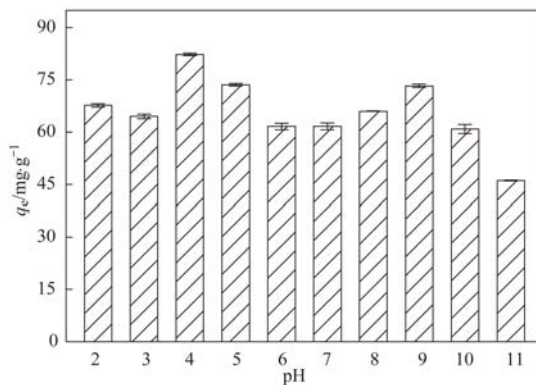


图5 pH值对碳粉吸附四环素的影响

Fig. 5 Effect of pH value on the adsorption of tetracycline to carbon powder

2.5 离子强度对碳粉吸附四环素的影响及碳粉的解吸

实验观察了溶液中不同浓度的 Ca^{2+} 和 Na^+ 对吸附的影响.如图6所示,对于 Ca^{2+} 来说,随着离子强度的增加,碳粉对四环素的吸附量有一定程度上的减少,而对于 Na^+ 来说,现象不明显.可能由于 Ca^{2+} 更容易与四环素螯合,从而阻碍了碳粉对四环素的吸附.同时测定了溶液中 Ca^{2+} 和 Na^+ 在吸附前后浓度的差别,发现溶液中 Ca^{2+} 的浓度在吸附后有一定程度上的下降,因此推测, Ca^{2+} 对吸附的影响主要作用是对四环素吸附位点的竞争,这也从侧面证实了碳粉对四环素吸附的原理主要是阳离子交换作用. Chang^[26] 等也发现了同样的现象. Parolo 等^[27] 研究了在有阳离子存在的情况下四环素离子的形态变化,发现四环素能与溶液中的金属阳离子发生螯合反应,也可能对吸附产生一定的影响,这一作用会受溶液 pH 值的影响. Gao 等^[8] 推测阳离子会产生静电屏蔽作用,从而影响吸附作用.

在吸附达到平衡后,立即使用 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的

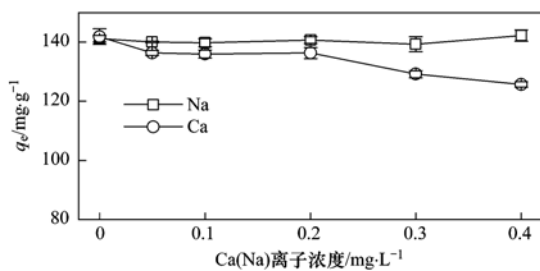


图6 不同阳离子浓度对碳粉吸附四环素的影响

Fig. 6 Effects of cation concentrations on the tetracycline adsorption to carbon powder

$CaCl_2$ 或 $NaCl$ 溶液对四环素初始浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的样品进行了解吸实验. $CaCl_2$ 的解吸效率分别为 14.3% 和 25%, $NaCl$ 的解吸效率分别为 7.42% 和 18.28%. $CaCl_2$ 比 $NaCl$ 的解吸效率高.这一研究结果与 Oleszczuk 等^[28] 的研究结果类似.作者研究了碳纳米管对氧四环素的吸附和解吸作用,通过解吸动力学研究,发现解吸过程分为两个阶段.在碳纳米管表面的四环素分子首先占据了高能的吸附位点,因此低浓度的四环素很难从吸附剂中解吸出来.而较高浓度的四环素的解吸率更高,说明在解吸的第二阶段四环素可以更快、更容易地从吸附剂中解吸出来.解吸效率较低也从侧面反映了碳粉对四环素吸附化学作用力很强,可以高效地将四环素从水中去除.但解吸效率低也说明该碳粉不能很好的循环使用,后期会对碳粉的解吸及其循环利用作进一步的研究.

3 结论

(1) 在 Li-Na-K 碳酸盐共熔体系中生成的纳米级不定形碳粉对水中的四环素表现出较好的吸附性能,最大吸附容量为 $127.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

(2) 实验通过动力学方程及吸附等温线的拟合发现,碳粉对四环素的吸附更符合拟二级动力学方程及 Freundlich 吸附等温线,表现为优惠吸附.

(3) 通过热力学的计算可知,碳粉对四环素的吸附是吸热的、自发的,以化学吸附为主.

(4) 吸附易受溶液初始 pH 值的影响,阳离子浓度对吸附有一定的影响.

(5) 使用 $CaCl_2$ 和 $NaCl$ 溶液对吸附剂进行解吸,解吸效率低.

(6) 碳粉对水中的四环素有较大的吸附容量,在水处理领域有较好的应用前景.后续还可对碳粉的结构进行修饰和优化,以便得到更大的吸附容量.

参考文献:

- [1] Chopra I, Roberts M. Tetracycline antibiotics: mode of action, applications, molecular biology, and epidemiology of bacterial resistance [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2001, **65**(2): 232-260.
- [2] Zhang X X, Zhang T, Fang H H P. Antibiotic resistance genes in water environment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **82**(3): 397-414.
- [3] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 725-759.
- [4] Kim S R, Nonaka L, Suzuki S. Occurrence of tetracycline

- resistance genes tet (M) and tet (S) in bacteria from marine aquaculture sites [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2004, **237** (1): 147-156.
- [5] Kim S, Jensen J N, Aga D S, *et al.* Tetracycline as a selector for resistant bacteria in activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(9): 1643-1651.
- [6] Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, *et al.* Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U. S. streams, 1999- 2000: A national reconnaissance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (6): 1202-1211.
- [7] Choi K J, Kim S G, Kim C W, *et al.* Determination of antibiotic compounds in water by on-line SPE-LC/MSD [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(6): 977-984.
- [8] Gao Y, Li Y, Zhang L, *et al.* Adsorption and removal of tetracycline antibiotics from aqueous solution by graphene oxide [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, **368**(1): 540-546.
- [9] Chen W R, Huang C H. Adsorption and transformation of tetracycline antibiotics with aluminum oxide [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(8): 779-785.
- [10] Ji L L, Shao Y, Xu Z Y, *et al.* Adsorption of monoaromatic compounds and pharmaceutical antibiotics on carbon nanotubes activated by KOH etching [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(16): 6429-6436.
- [11] An W H, Xiao H, Yu M, *et al.* Adsorptive removal of trace oxytetracycline from water by acid-modified zeolite: influencing factors [J]. *Water Science & Technology*, 2013, **68** (11): 2473-2478.
- [12] Huang L H, Sun Y Y, Wang W L, *et al.* Comparative study on characterization of activated carbons prepared by microwave and conventional heating methods and application in removal of oxytetracycline (OTC) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **171**(3): 1446-1453.
- [13] Lin Y X, Xu S, Li J. Fast and highly efficient tetracyclines removal from environmental waters by graphene oxide functionalized magnetic particles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **225**(1): 679-685.
- [14] Tung V C, Allen M J, Yang Y, *et al.* High-throughput solution processing of large-scale graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, **4**(1): 25-29.
- [15] Yin H Y, Mao X H, Tang D Y, *et al.* Capture and electrochemical conversion of CO₂ to value-added carbon and oxygen by molten salt electrolysis [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, **6**(5): 1538-1545.
- [16] Zhu X D, Liu Y C, Qian F, *et al.* Preparation of magnetic porous carbon from waste hydrochar by simultaneous activation and magnetization for tetracycline removal [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **154**: 209-214.
- [17] 黎园, 赵纯, 邓慧萍. 2 种孔径沸石分子筛对水中土霉素的去除研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 990-995.
- [18] Hameed B H. Equilibrium and kinetic studies of methyl violet sorption by agricultural waste [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 204-212.
- [19] 童锡臻, 石宝友, 解岳, 等. 改性活性炭对水中 PFOS 的吸附去除研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3132-3138.
- [20] Liao P, Zhan Z, Dai J, *et al.* Adsorption of tetracycline and chloramphenicol in aqueous solutions by bamboo charcoal: A batch and fixed-bed column study [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **228**: 496-505.
- [21] Guan W S, Wang X, Pan J M, *et al.* Synthesis of magnetic halloysite composites for the effective removal of tetracycline hydrochloride from aqueous solutions [J]. *Adsorption Science & Technology*, 2012, **30**(7): 579-592.
- [22] 陈瑞萍, 张丽, 于洁, 等. 活性污泥对四环素的吸附性能研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 156-162.
- [23] 叶林静, 关卫省, 卢勋, 等. 改性纳米 Fe₃O₄ 去除水溶液中四环素的研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, **14**(1): 202-207.
- [24] 张爱丽, 刘玥, 周集体, 等. 壳聚糖复合树脂对亚硝酸盐氮的吸附性能[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 463-468.
- [25] 高鹏, 莫测辉, 李彦文, 等. 高岭土对喹诺酮类抗生素吸附特性的初步研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1740-1744.
- [26] Chang P H, Li Z H, Jean J S, *et al.* Adsorption of tetracycline on 2: 1 layered non-swelling clay mineral illite [J]. *Applied Clay Science*, 2012, **67-68**: 158-163.
- [27] Parolo M E, Avena M J, Savini M C, *et al.* Adsorption and circular dichroism of tetracycline on sodium and calcium-montmorillonites [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, **417**: 57-64.
- [28] Oleszczuk P, Pan B, Xing B S. Adsorption and desorption of oxytetracycline and carbamazepine by multiwalled carbon nanotubes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (24): 9167-9173.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i>	(11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i>	(18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i>	(25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i>	(34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong	(40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng	(49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling	(64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i>	(72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i>	(80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i>	(87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang	(107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i>	(114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i>	(121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i>	(151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i>	(163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i>	(172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i>	(179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i>	(186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i>	(194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i>	(202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i>	(209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i>	(215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i>	(221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui	(227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i>	(237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i>	(244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i>	(252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i>	(259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i>	(266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i>	(274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i>	(280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i>	(295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i>	(301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i>	(309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i>	(314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i>	(325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i>	(333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i>	(343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i>	(349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i>	(357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu	(365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行