

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮	(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健	(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋	(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红	(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军	(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅	(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲	(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵	(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静	(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰	(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅	(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰	(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林	(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷	(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠	(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军	(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻	(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌	(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永	(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴	(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋	(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成	(1564)
酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青	(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏	(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国	(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红	(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋	(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰	(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅	(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙	(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣	(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪	(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松	(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌	(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州	(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军	(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静	(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟	(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强	(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才	(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红	(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红	(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛	(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩	(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英	(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵	(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰	(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军	(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野	(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰	(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙	(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷	(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥	(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁	(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)	信息(1490,1496,1586,1743)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律

邓梦洁¹, 于水利^{1,2*}, 时文歆¹, 衣雪松¹

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 研究了阴离子交换膜对阴离子型聚丙烯酰胺(HPAM)溶液在阴离子交换膜上的吸附量、吸附平衡时间, 考察了初始 HPAM 溶液浓度、pH 值以及溶液中其他离子浓度对其在离子交换膜上吸附的影响, 目的是阐明阴离子交换膜对 HPAM 分子的吸附动力学过程、探讨各影响因素对吸附过程的影响。结果表明, 阴离子型部分水解聚丙烯酰胺在阴离子交换膜上有明显的吸附作用, 但在阳离子交换膜上吸附量几乎为 0; 阴离子交换膜对聚合物的吸附平衡时间随聚合物溶液初始浓度的增大而延长, 且不同浓度、不同温度下的吸附过程动力学特征都能很好地遵循准二级动力学模型; 303、308 和 313 K 温度下, 阴离子交换膜对聚合物的等温吸附可用 Freundlich 等温吸附模型很好地拟合, 相关系数 R^2 均达到 0.99 以上, 温度越高, 吸附量越大; 聚合物溶液 pH 值和离子浓度对吸附效果有显著影响: pH = 6 时, 吸附量达到最大值; 吸附量随着离子浓度的增加而增大。

关键词: 阴离子型部分水解聚丙烯酰胺; 离子交换膜; 吸附动力学; 吸附等温线; 影响因素

中图分类号: X741 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1625-07

Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes

DENG Meng-jie¹, YU Shui-li^{1,2}, SHI Wen-xin¹, YI Xue-song¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Regular pattern and impact factors of adsorption of partly hydrolysis of anionic polyacrylamide (HPAM) on the surface of ion exchange membrane were studied. Static adsorption experiments were carried out to measure the adsorption capacity and time to absorption equilibrium when HPAM was adsorbed on the surface of ion exchange membrane under different temperatures and HPAM concentrations. Effects of the initial HPAM concentrations, pH value, and ion concentrations in the HPAM solution, on the adsorption were also studied. The objectives of this study were to illuminate the adsorption kinetics of HPAM on the ion exchange membrane and to investigate the influences of some impact factors on the adsorption. Results showed that anion exchange membranes had a strong affinity adsorption for HPAM, but the adsorption capacity of cation exchange membranes was almost none. The adsorption equilibrium time of HPAM onto anion exchange membranes was increased with the increasing of initial concentration of HPAM. The adsorption kinetics could be described by the pseudo-second-order kinetics model under different initial concentrations and temperatures. Under different temperatures of 303, 308 and 313 K, the process of isothermal adsorption of HPAM onto anion exchange membranes could be fitted well by Freundlich equations with a high correlation coefficient R^2 (>0.99). Increasing of temperature could be able to enhance the process of adsorption. The pH value and ion concentrations of HPAM solution affected significantly on the adsorption. When pH is 6, the adsorption capacity reached the maximum value. The adsorption capacity was also increased with the increasing of ion concentrations.

Key words: partly hydrolysis of anionic polyacrylamide; ion exchange membrane; adsorption dynamics; adsorption isotherm; impact factors

离子交换膜可用于降低聚合物驱采油废水的矿化度^[1], 实现聚驱采油废水回用^[2,3], 但离子交换膜的污染限制了其应用^[4]。聚驱采油废水中含有聚丙烯酰胺, 研究表明高分子有机物是电渗析脱盐降低矿化度过程中的主要污染物^[5], 污染物在离子交换膜上的沉淀和吸附是膜污染的主要成因^[6]。

本研究采用静态吸附法考察了阴离子型部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)在离子交换膜的吸附规律及影响因素, 之所以采用静态吸附法, 是因为该方法可

以排除因液体流动和压力梯度造成的浓差极化^[7]、聚合物形变等影响因素, 这种条件下 HPAM 对膜的污染只与膜材料的物化性能及 HPAM 溶液的性质有关。本研究为聚驱采油废水降矿化度处理中离子

收稿日期: 2011-06-03; 修订日期: 2011-12-02

基金项目: 科技部国际合作项目(中日韩)(2010DFA92460); 国家高新技术研究发展计划(863)项目(2008AA06Z304); 国家自然科学基金项目(50978068)

作者简介: 邓梦洁(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理及其资源化, E-mail: hnudengmj070623@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ysl@tongji.edu.cn

交换膜的污染控制及清洗技术开发奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用离子交换膜的性能指标如表 1 所示,表中数据由离子交换膜的生产厂家提供。

表 1 异相离子交换膜材料性能指标
Table 1 Material performance of heterogeneous ion exchange membranes

指标项目	阳膜	阴膜
交换容量(干)/mol·kg ⁻¹	≥2.0	≥1.8
膜面电阻/Ω·cm ⁻²	≤11	≤12
选择透过率/%	≥90	≥89
使用温度/℃	≤40	≤40
湿态水份/%	35~50	30~45
一次脱盐率/%	≥18	≥18

实验选用大庆炼化公司生产的相对分子质量为 688×10^4 的阴离子型部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)。配制不同浓度 HPAM 溶液时,在溶解后均用磁力搅拌器搅拌 24 h 以上,以更符合实际情况。

实验所用其它化学试剂为淀粉、碘化镉、醋酸钠、溴水、溴化钾、甲酸钠、氢氧化钠、盐酸、氯化钠、氯化钾、氯化钙、六水氯化镁、硫酸钠及碳酸氢钠等。以上试剂均为分析纯。实验用水均为去离子水。

1.2 实验仪器

紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司);空气浴恒温振荡器(HZQ-C 型,哈尔滨市东联电子技术开发有限公司);分析天平(Mettler AB204-N);精密 pH 计(211 型,北京哈纳科仪科技有限公司);数显恒温磁力搅拌器(85-2 型,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 吸附动力学

在一系列 250 mL 的锥形瓶中分别加入一面积为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的离子交换膜和 100 mL 初始浓度一定但浓度不一的(20、200、300 和 2 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的 HPAM 溶液。由于油田采出水水温较高,即便是经过系列处理后到达电渗析器的离子交换膜时其温度通常仍可达到 303~313 K,因此本研究中确定选用温度为 303、308 和 313 K 的 HPAM 溶液展开研究。对盛有上述不同浓度的 HPAM 溶液的锥形瓶封口后分别在 303、308 和 313 K 下以 $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速恒温振荡,每隔一定时间取出 1 个锥形瓶,用淀粉-碘化镉显色法^[8]测定溶液中 HPAM 浓度(此法是目前大庆油田测量聚合物溶液浓度使用的方法)。

根据吸附前后 HPAM 的浓度差计算离子交换膜上 HPAM 吸附量,平衡吸附量 q_e 由下式计算:

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

式中, q_e 为离子交换膜吸附 HPAM 的平衡吸附量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); V 为溶液的体积(L); S 为离子交换膜面积(m^2); c_0 为原溶液中吸附质的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_e 为吸附平衡时溶液中剩余吸附质浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

1.3.2 吸附等温线

分别在一系列 250 mL 的锥形瓶中加入一张面积为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的离子交换膜和 100 mL 初始浓度不同的 HPAM 溶液;初始浓度分别为 20、100、200、300、500、1 000、1 500、2 000、3 000、4 000 和 5 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HPAM 溶液,封口后分别在 303、308 和 313 K 下以 $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速恒温振荡至各自的吸附平衡时间;然后用淀粉-碘化镉显色法测定溶液中剩余 HPAM 浓度。

1.3.3 吸附影响因素

向一系列 250 mL 锥形瓶中分别加入面积为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的离子交换膜和 100 mL HPAM 溶液,分别改变 HPAM 溶液初始浓度、HPAM 溶液 pH 值^[9]和溶液中离子浓度,封口后以 $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速恒温振荡至吸附平衡时间;之后用淀粉-碘化镉显色法测定溶液中剩余 HPAM 浓度。

2 结果与分析

2.1 HPAM 吸附的动力学过程

通过在不同温度下进行实验,研究不同时间内离子交换膜对 HPAM 的吸附量,进而得出反应速率变化的规律和物质浓度随时间变化的规律。阴、阳离子交换膜对 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ HPAM 溶液($\text{pH} = 7.02$, $T = 303 \text{ K}$)的吸附量随时间而变化见图 1。

从图 1 中知,HPAM 在阴离子交换膜上的吸附量随时间的增加而增加,并且在 12 h 之后达到最大吸附量 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$,将溶液中的 HPAM 吸附完全;而阳离子交换膜对 HPAM 几乎没有吸附作用,所以在后续实验中只选用阴离子交换膜来进行。

阴离子交换膜在不同温度下对初始浓度为 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.02$ HPAM 溶液的吸附量见图 2。从中可见,3 种温度下,反应初始阶段,阴离子交换膜对 HPAM 的吸附速率较大,吸附量上升很快;随着吸附反应的不断进行,吸附速率降低,吸附量上升幅度较小,在 6~12 h 后吸附基本达到平衡。因此,在 HPAM 初始浓度为 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,阴离子交换膜的

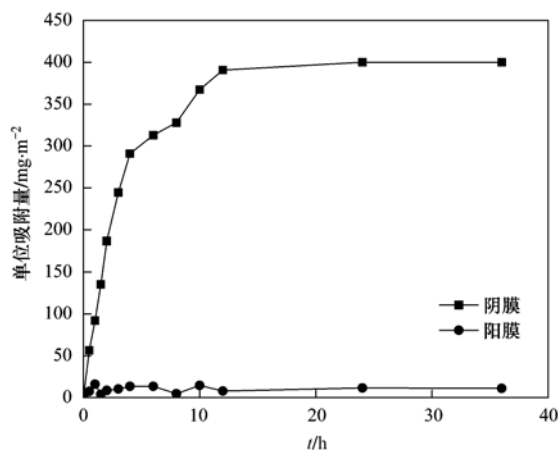


图1 HPAM在阴阳离子交换膜上的吸附

Fig. 1 Adsorption of HPAM on anion and cation exchange membranes

吸附平衡时间随温度的升高而降低,由 303 K 时的 12 h 左右降至 308 K 与 313 K 的 6 h 左右,但 308 K 与 313 K 时相差并不大;最后都能达到最大吸附量 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$.

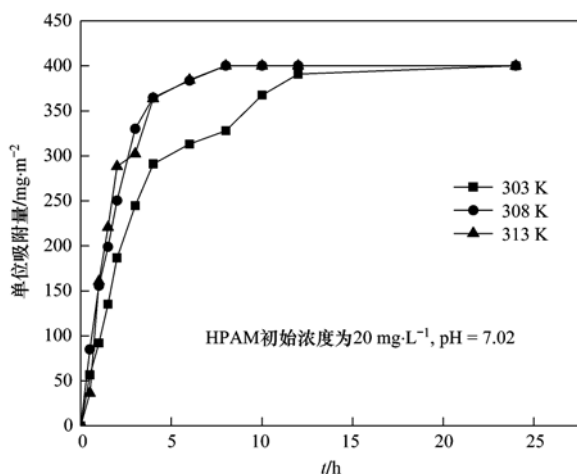


图2 不同温度下 HPAM 在阴离子交换膜上的吸附动力学曲线

Fig. 2 Adsorption kinetics of HPAM on anion exchange membranes at different temperatures

将阴离子交换膜对 HPAM 的吸附量用如下准二级动力学模型线性方程拟合^[10]:

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

式中, k_f 代表准二级吸附反应速率常数 [$\text{m}^2 \cdot (\text{h} \cdot \text{mg})^{-1}$]; q_e 代表平衡吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); q_t 代表 t 时间吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$). 将 t/q_t 对 t 作图, 如图 3 所示, 当 HPAM 初始浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 303、308 和 313 K 温度下的准二级动力学模型拟合直线方程的相关系数 R^2 分别为 0.991 47、0.993 27 和 0.996 15, 达到显著相关, 可见阴离子交换膜对

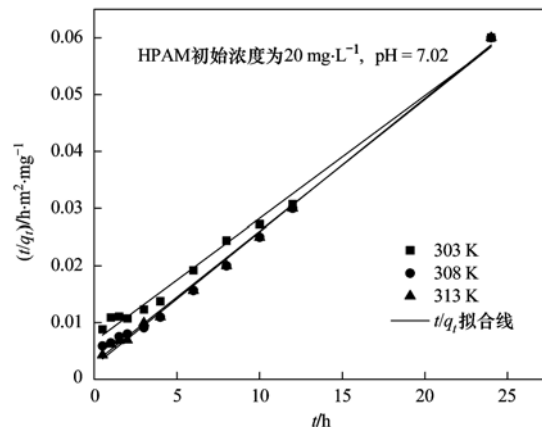


图3 不同温度下 HPAM 在阴离子交换膜上吸附准二级速率方程拟合曲线

Fig. 3 Pseudo-second-order adsorption kinetics of HPAM on anion exchange membranes at different temperatures

HPAM 吸附的动力学特征遵循准二级动力学模型. 二级吸附反应速率常数 k_f 值远小于 HPAM 在阴离子交换膜上按 Freundlich 公式的吸附 k_f 值.

阴离子交换膜在不同温度下对初始浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.05$ HPAM 溶液的吸附量见图 4. 从中可见, 与初始浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 类似, 不同温度下, 在反应初始阶段, 阴离子交换膜对 HPAM 的吸附速率较大, 吸附量上升很快; 随着吸附反应的不断进行, 吸附速率及吸附量上升速度较小, 在 40 ~ 48 h 后吸附基本达到平衡. 因此, 在 HPAM 初始浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 情况下, 随着温度的升高, 阴离子交换膜的吸附速度加快, 吸附平衡时间逐渐降低, 由 303 K 时的 48 h 左右降至 313 K 的 36 h 左右; 并且最后能达到的平衡吸附量也呈上升趋势, 由 303 K 时的 $1329.74 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 308 K 时的 $1411.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至

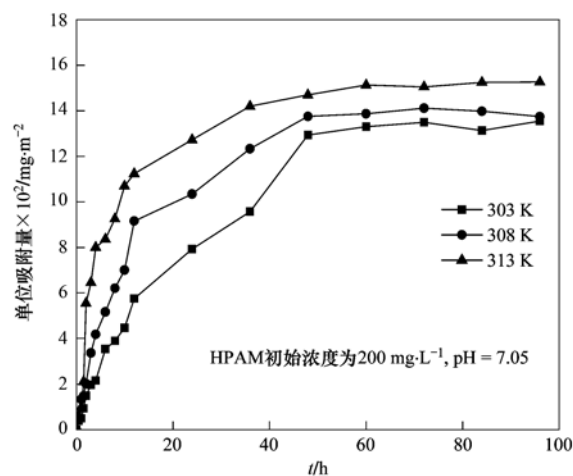


图4 不同温度下 HPAM 在阴离子交换膜上的吸附动力学曲线

Fig. 4 Adsorption kinetics of HPAM on anion exchange membranes at different temperatures

313 K 的 $1\,512.46\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

当 HPAM 初始浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 303、308 和 313 K 下的准二级速率方程拟合曲线如图 5 所示, 直线方程的相关系数 R^2 分别为 0.978 86、0.994 45 和 0.990 27, 可见初始浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时阴离子交换膜对 HPAM 吸附的动力学特征也能较好地遵循准二级动力学模型。

在 HPAM 初始浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{pH}=7.14$ 和初始浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{pH}=7.20$ 时, 阴离子交换膜在不同温度下对 HPAM 的吸附动力学曲线都具有初始浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的相同变化趋势, 如图 6 所示。初始浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 吸附平衡时间为 48 h 左右, 初始浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 吸附平衡时间为 60 h 左右, 且随着温度的升高, 达到平衡的时间逐渐缩短, 吸附量亦有所提高。

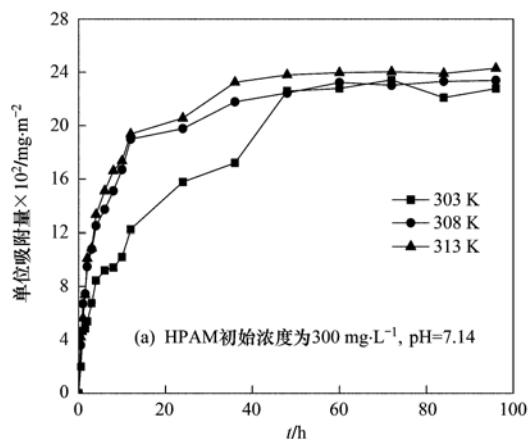


图 6 不同温度下 HPAM 在阴离子交换膜上的吸附动力学曲线

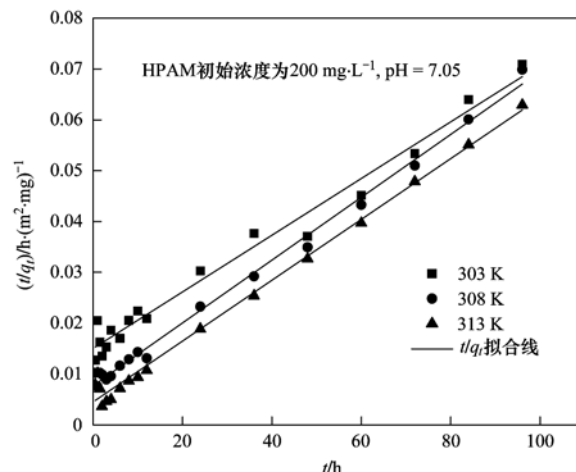


图 5 不同温度下 HPAM 在阴离子交换膜上吸附准二级速率方程拟合曲线

Fig. 5 Pseudo-second-order adsorption kinetics of HPAM onto anion exchange membranes at different temperatures

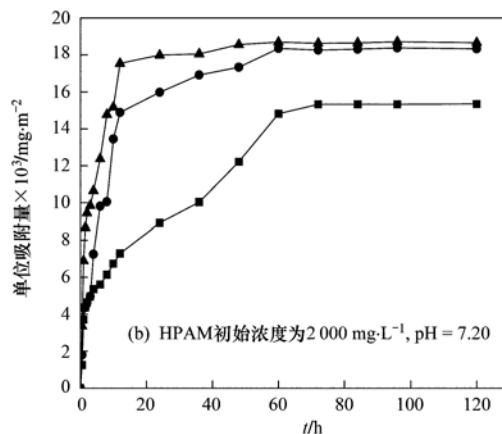


Fig. 6 Adsorption kinetics of HPAM onto anion exchange membranes at different temperatures

HPAM 初始浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 在 303、308 和 313 K 温度下的准二级速率方程拟合曲线如图 7 所示。由拟合结果知, 初始浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 303、308 和 313 K 温度下的直线拟

合方程相关系数 R^2 分别为 0.985 38、0.999 39 和 0.999 47; 初始浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 直线拟合方程的相关系数 R^2 分别为 0.975 92、0.998 55 和 0.999 72。因此, 初始浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2\,000$

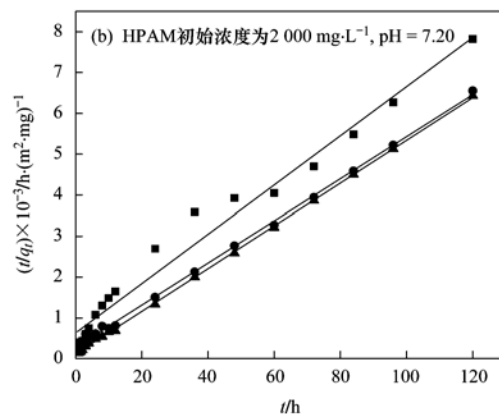
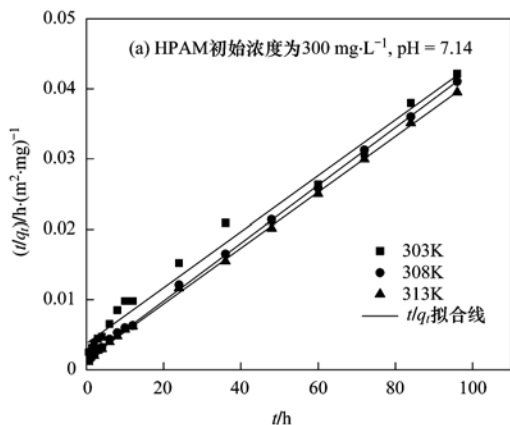


图 7 不同温度下 HPAM 在阴离子交换膜上吸附准二级速率方程拟合曲线

Fig. 7 Pseudo-second-order adsorption kinetics of HPAM onto anion exchange membranes at different temperature

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,阴离子交换膜对 HPAM 吸附的动力学特征也较好地遵循准二级动力学模型.

2.2 不同温度下阴离子交换膜对 HPAM 的等温吸附模型

常见的模型有 Freundlich 等温吸附模型[式(3)]和 Langmuir 等温吸附模型[式(4)].

$$\lg q_e = \lg k + \frac{1}{n} \lg c_e \tag{3}$$

$$q_e = \frac{q_m \cdot K \cdot c_e}{1 + K \cdot c_e} \tag{4}$$

式中, q_e 为平衡时吸附量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$), c_e 为吸附平衡时溶液浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). k 、 n 为 Freundlich 等温吸附常数; q_m 为最大吸附量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$); K 为 Langmuir 等温吸附方程式常数.

本研究中不同温度下阴离子交换膜吸附 HPAM 的吸附等温线见图 8. 利用 Freundlich 等温吸附模型对实验数据进行拟合分析,即以 $\lg q_e$ 对 $\lg c_e$ 作图,如图 9 所示. 按 Freundlich 方程和 Langmuir 方程拟合的回归参数见表 2,以相关系数 R^2 作为判断标准.

从表 2 结果看出,用 Freundlich 等温方程进行拟合的相关系数 R^2 都在 0.99 以上,而 Langmuir 方程的相关系数都很低. 因此,HPAM 在阴离子交换膜上的吸附特征更适于用 Freundlich 等温吸附模型进行描述.

2.3 HPAM 吸附的影响因素

2.3.1 溶液 pH 值对吸附效果的影响

不同 HPAM 初始浓度下,阴离子交换膜对不同 pH 值 HPAM 溶液的吸附实验结果如图 10 所示. 实

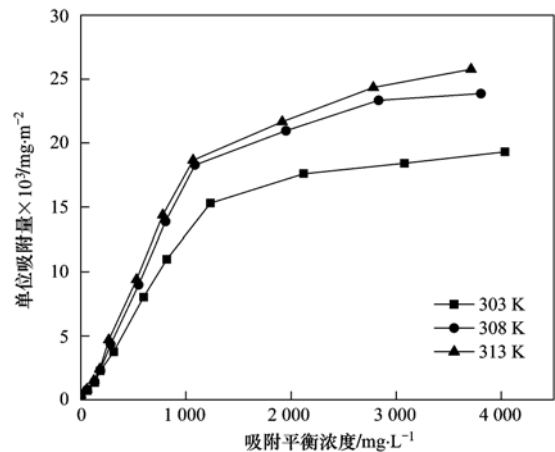


图 8 不同温度下阴离子交换膜对 HPAM 的吸附等温线
Fig. 8 Adsorption isotherm of HPAM on anion exchange membrane at different temperatures

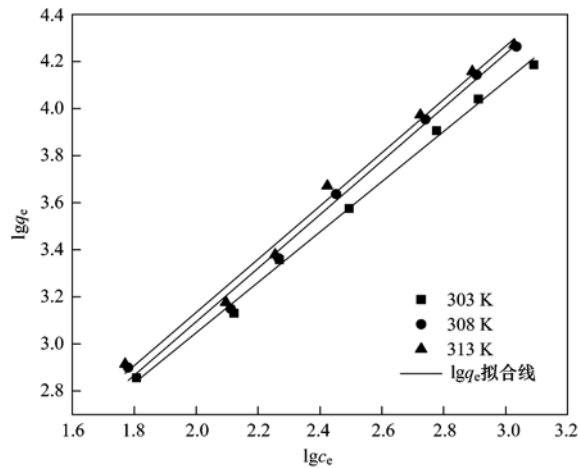


图 9 不同温度下 HPAM 在阴离子交换膜上吸附的 Freundlich 等温线
Fig. 9 Freundlich model of HPAM adsorption onto anion exchange membranes at different temperatures

表 2 阴离子交换膜吸附 HPAM 的 Freundlich 与 Langmuir 等温方程参数

Table 2 Freundlich and Langmuir parameters of HPAM onto anion exchange membranes

T/K	Freundlich 方程 $\lg q_e = \lg k + (1/n) \lg c_e$			Langmuir 方程 $c_e/q_e = 1/(Kq_m) + c_e/q_m$		
	$\lg k$	$1/n$	R^2	$1/(Kq_m)$	$1/q_m$	R^2
303	0.909 5	1.069 19	0.996 00	0.088 83	-1.20E-05	0.249 93
308	0.817 46	1.138 4	0.991 98	0.081 66	-2.59E-05	0.546 05
313	0.872 14	1.130 88	0.990 66	0.074 25	-2.18E-05	0.421 16

验中,用 1.8% 的盐酸溶液和 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠溶液调节 pH. pH 分别为 2.0、3.0、4.0、6.0、7.0 和 8.0,温度 $T=303\text{ K}$. 结果表明,无论在何种初始浓度下,吸附受 pH 值的影响表现出相同的趋势:当 HPAM 溶液 pH 值在 2~6 时,随着 pH 值的增加,阴离子交换膜对 HPAM 的吸附量增大;当原水 pH 值在 6~8 时,阴离子交换膜的吸附量开始下降;pH=6 时,HPAM 的吸附量达到最大值.

2.3.2 溶液离子浓度对吸附效果的影响

在不同 HPAM 初始浓度下,阴离子交换膜对不同离子浓度的 HPAM 溶液的吸附实验结果如图 11 所示. 实验中,模拟大庆油田聚合物驱采出水的离子组成,用以下 6 种无机盐 NaCl、 Na_2SO_4 、KCl、 CaCl_2 、 $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 NaHCO_3 调整吸附体系的离子浓度分别为 617、1 234、2 468、4 936、9 873 和 $19\,746\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,温度 $T=303\text{ K}$. 结果表明,无论在何

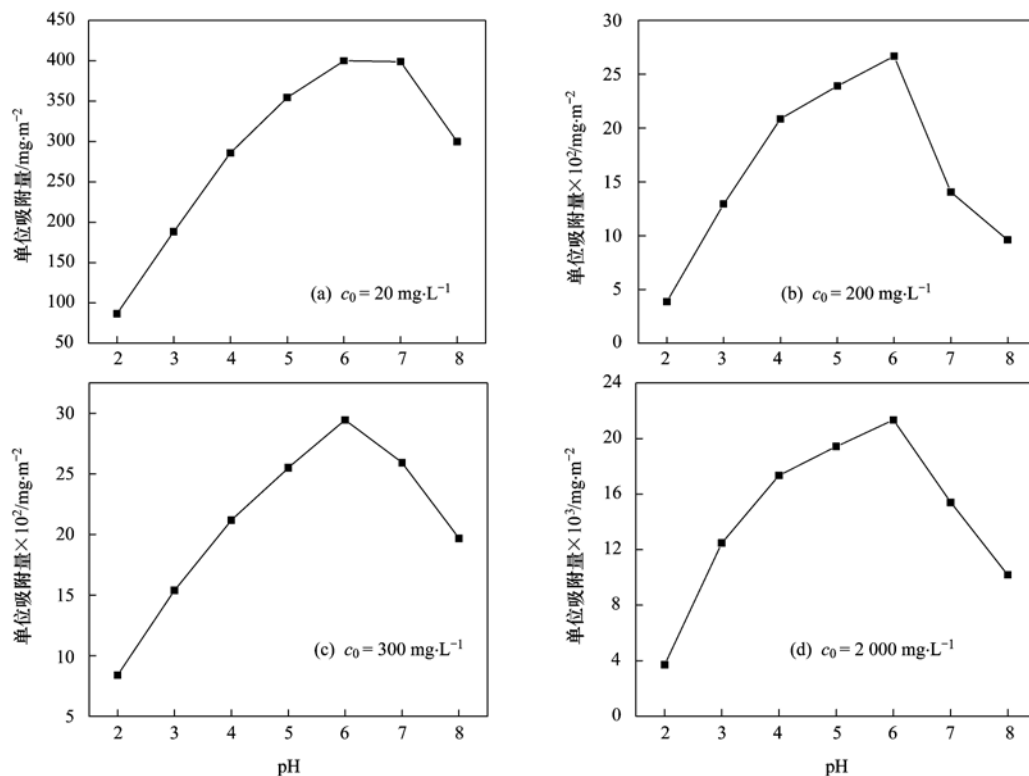


图 10 pH 值对 HPAM 在阴离子交换膜上吸附的影响

Fig. 10 Effect of pH on HPAM adsorption onto anion exchange membranes

种初始浓度下,吸附受离子浓度影响表现出相同的趋势: HPAM 在阴离子交换膜上的吸附随着离子浓度的增加显著增大,吸附量都比同浓度下未加离子时有明显提高。

3 讨论

用 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附模型对吸附等温线进行线性拟合时,根据相关系数 R^2 (表 2) 得知用 Freundlich 等温方程进行拟合的相关系数 R^2 都在 0.99 以上,说明 Freundlich 等温方程能很好地拟合 HPAM 在阴离子交换膜上的吸附特征,因此可以说该吸附过程并不是简单的单层定点吸附. 在相同的吸附平衡浓度时,随着温度的升高,吸附量逐渐增大(如图 8),说明此过程是化学吸附,温度越高越有利于吸附过程。

pH 值对 HPAM 溶液的吸附影响作用可能是由于 HPAM 所带的荷电基团为 COO^- , 在较低 pH 值时,溶液中的 H^+ 浓度高, H^+ 会与 HPAM 通过氢键发生强烈的相互作用^[8], 极性水分子还会在分子周围形成溶剂化层或成为束缚水,使 HPAM 无法竞争阴离子交换膜上的交换基团点位, 故 HPAM 在阴离子交换膜上吸附量不会很大,因此 HPAM 溶液 pH 值在 2~6 时,随着 pH 值的增加,阴离子交换膜

对 HPAM 的吸附量逐渐增大(图 10); 随着 pH 值的增加,溶液中 H^+ 浓度减少, COO^- 与 H^+ 的作用减小,但 OH^- 浓度增加, OH^- 带负电荷,会参与和 HPAM 竞争阴离子交换膜上的交换基团点位,所以当原水 pH 值在 6~8 时,阴离子交换膜的吸附量开始下降. 因此,HPAM 可能在 pH=6 时找到了 H^+ 和 OH^- 浓度的最佳平衡点,故此时在阴离子交换膜上的吸附量达到最大(图 10)。

随着水中离子浓度的增加,HPAM 在阴离子交换膜上的吸附量逐渐增加(图 11),并且吸附量都比同 HPAM 浓度下未加入离子时有明显提高,这可能是由于加入的离子首先在水中形成水合离子,而一条 HPAM 长链上有多个 COO^- 基团,这些基团吸附在水合离子表面,就像许多水合离子将聚丙烯酰胺分子包裹起来,并带动其一起向阴离子交换膜上迁移,从而增加 HPAM 在膜上的吸附量。

4 结论

(1) 在静态吸附实验条件下,HPAM 在阴离子交换膜上有明显的吸附作用,但在阳离子交换膜上吸附量几乎为 0。

(2) 阴离子交换膜对不同浓度下 HPAM 的吸附过程动力学特征都能很好地遵循准二级动力学模

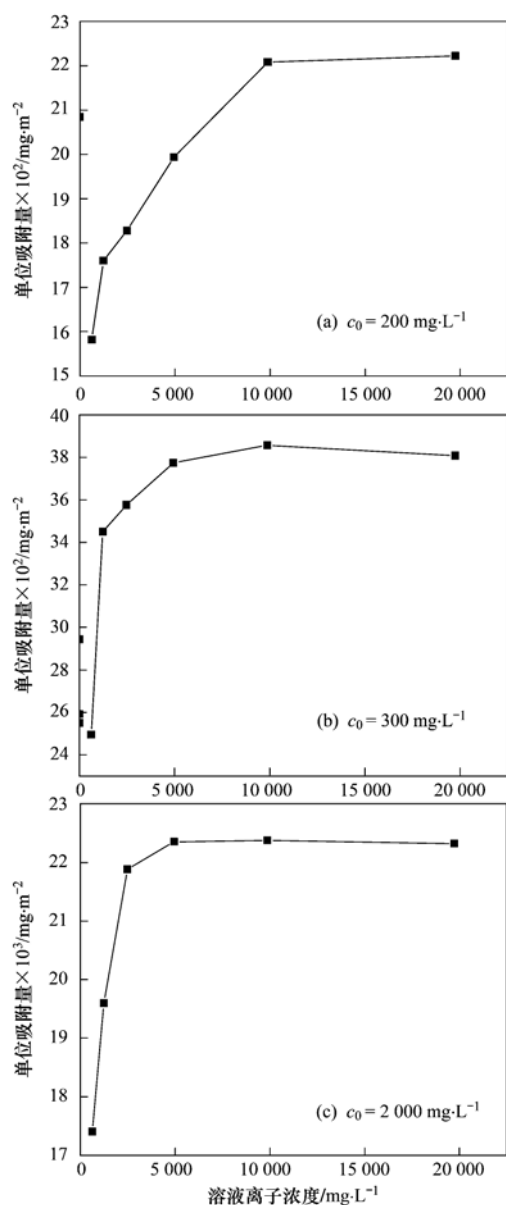


图 11 离子浓度对 HPAM 在阴离子交换膜上吸附的影响

Fig. 11 Effect of ion concentration on HPAM adsorption onto anion exchange membranes

型. 随着 HPAM 溶液初始浓度的增加, 阴离子交换膜对 HPAM 吸附的平衡时间随之延长; 对于固定的 HPAM 溶液初始浓度, 温度的升高会使吸附量有所提高, 而且使达到吸附平衡所需的时间缩短.

(3) 实验温度条件下, 阴离子交换膜对 HPAM 的等温吸附线可用 Freundlich 等温吸附模型拟合, 相关系数 R^2 均达到 0.99 以上; 在相同的吸附平衡浓度时, 随着温度的升高, 吸附量逐渐增大.

(4) HPAM 溶液的 pH 值和溶液中其它离子的浓度对吸附效果有显著影响: pH 值过高或过低时, 阴离子交换膜的吸附量均有所下降; 当 pH = 6 时, HPAM 的吸附量达到最大值; HPAM 的吸附量随着溶液中其它离子浓度的增加而增大.

参考文献:

- [1] 王北福. 电渗析回用聚驱污水为配聚用水的试验研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2007, **23**(1): 22-27.
- [2] Jing G L, Wang X Y, Zhao H. Study on TDS removal from polymer-flooding wastewater in crude oil: extraction by electrodialysis[J]. Desalination, 2009, **244**(1-3): 90-96.
- [3] Jing G L, Wang X Y, Han C J. The effect of oilfield polymer-flooding wastewater on anion-exchange membrane performance[J]. Desalination, 2008, **220**(1-3): 386-393.
- [4] 荆国林, 王晓玉, 赵海. 含聚污水对离子交换膜污染的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, **39**(8): 1249-1252.
- [5] Lee H, Hong M K, Han S D, *et al.* Fouling of an anion exchange membrane in the electrodialysis desalination process in the presence of organic foulants[J]. Desalination, 2009, **238**(1-3): 60-69.
- [6] Tanaka N, Nagase M, Higa M. Preparation of aliphatic-hydrocarbon-based anion-exchange membranes and their anti-organic-fouling properties[J]. Journal of Membrane Science, 2011, **384**(1-2): 27-36.
- [7] Strathmann H. Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications[J]. Desalination, 2010, **264**(3): 268-288.
- [8] 王北福. 超滤-电渗析组合工艺回用聚合物驱采出水为配聚用水的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2006. 30-31.
- [9] Ayala-Bribiesca E, Araya-Farias M, Pourcelly G, *et al.* Effect of concentrate solution pH and mineral composition of a whey protein diluate solution on membrane fouling formation during conventional electrodialysis[J]. Journal of Membrane Science, 2006, **280**(1-2): 790-801.
- [10] 游少鸿, 佟小微, 朱义年. 天然沸石对氨氮的吸附作用及其影响因素[J]. 水资源保护, 2010, **26**(1): 70-74.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingtian, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人