

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618)	《环境科学》征稿简则 (1635)
信息 (1724, 1769, 1800)	

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用

黄乐^{1,2}, 徐颖峰^{1,2}, 谢茜青¹, 赵娴¹, 冯华军^{1,2*}

(1. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012; 2. 浙江省固体废物处理与资源化重点实验, 杭州 310012)

摘要: 高盐废水处理存在处理难度大和能耗成本高等问题. 近年来发展的界面光蒸汽处理技术以绿色、高效和低能耗等特点成为了目前水资源回收利用领域的研究热点. 本研究以纤维状结构的碳化氮(h-CN)修饰石墨烯(r-GO), 通过水热反应制备了新型三维多孔石墨烯复合材料(3D h-CN/r-GO), 并以硝基苯和苯酚作为模拟污染物, 考察了其光热蒸发处理高盐废水的性能. 研究表明, 所制备的3D h-CN/r-GO材料具备宽光谱吸收范围和多级孔道结构, 并呈现出快速热响应的特点. 在模拟太阳光照条件下, 光蒸汽转化效率可达90.4%. 并且在处理过程中可实现硝基苯和苯酚等常见挥发性污染物的吸附, 其吸附容量分别为67.6 mg·g⁻¹和57.5 mg·g⁻¹. 而且, 3D h-CN/r-GO可实现长时间稳定的光热水体蒸发回收, 且对污染物及盐分截留率高达98%左右, 冷凝水体达到污水处理的排放标准. 因此, 本研究为高盐废水的低能耗和低成本处理提供了一种新的技术.

关键词: 光热界面蒸发; 高盐废水; 吸附; 石墨烯; 复合改性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1716-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908096

3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment

HUANG Le^{1,2}, XU Ying-feng^{1,2}, XIE Qian-qing¹, ZHAO Xian¹, FENG Hua-jun^{1,2*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The treatment of high salinity wastewater is complex with high cost and energy consumption. Interfacial solar vapor generation technology because of its green, high efficiency and low energy consumption has become a hot spot in the field of water resource recovery and utilization. In this study, a novel three-dimensional porous graphene composite material (3D h-CN/r-GO) was designed by a hydrothermal reaction with fibrous carbon nitrogen (h-CN) modified graphene (r-GO), and its performance for adsorption of nitrobenzene and phenol as simulated contaminants via photothermal evaporation was studied. The results showed that 3D h-CN/r-GO has a broad-spectrum absorption and multistage channel structure and presents the characteristics of fast thermal response. Its light steam conversion efficiency can reach 90.4% under the condition of simulated sunlight. The adsorption of nitrobenzene, phenol, and other common volatile pollutants can be realized in the process of treatment, and its adsorption capacities of nitrobenzene and phenol were 67.6 mg·g⁻¹ and 57.5 mg·g⁻¹, respectively. Moreover, 3D h-CN/r-GO can realize efficient interfacial solar vapor generation with long-time stability, and its retention rate of pollutants and salts is up to 98%. The recovery and utilization of steam condensate meets the discharge standard. Therefore, this study provides a promising way for the treatment of high salinity wastewater with low energy consumption and cost.

Key words: interfacial solar vapor generation; high salinity wastewater; adsorption; graphene; composite

随着我国工业的快速发展,工业废水排放量激增,文献[1]显示,其排放总量约为690亿t,其中,高盐废水产量约占总废水量的5%,且每年仍在以2%的速度增长.由于此类废水盐分含量高、存在大量高毒易挥发的有机污染物,难以直接采用生化处理,而传统物化处理技术,如电渗析和反渗透等,存在处理工艺复杂、能耗成本居高不下等问题^[2~4].因此,亟需开发一种新型的绿色节能和经济环保的高盐废水处理技术.

界面光蒸汽转化技术是一种将光热转化所得的能量限制于水-气界面,经界面热积聚局部加热水体,显著提高光热水体蒸发回收效率的新型废水处理技术^[5~7],具有绿色节能和经济环保等特点.现阶段已有许多新型碳基材料被应用于海水淡化、原油吸附及蒸汽灭菌等^[8~13].例如, Liu等^[14]利用新型氧化石墨烯复合材料进行海水淡化,在12 kW·m⁻²

光照条件下,蒸汽产生效率为82.8%. Liu等^[15]设计了一款超疏水亲油型石墨烯基材料,可实现80%材料的回收利用; Li等^[16]利用碳基吸收体快速光热响应的特点,持续产生蒸汽温度可达121℃,并可将灭菌周期缩短至8.4 min.因此,该技术有望实现低能耗、低成本和高效率的高盐废水净化,并实现水资源回收利用.但现有的界面光蒸汽转化材料大多是基于石墨烯基的多孔碳材料,虽然此类材料具备摩尔比热低、光谱吸收范围宽和光热转化效率高等优点,但仍存在官能团较少、极性较弱等缺陷,难以有效吸附随水体蒸发而逸出的许多极性有机污染物,

收稿日期: 2019-08-11; 修订日期: 2019-11-19

基金项目: 浙江省科技计划项目(2019C03110); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划项目(2019R408081)

作者简介: 黄乐(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制与资源化, E-mail: 1044454239@qq.com

* 通信作者, E-mail: fenghuajun@mail.zjgsu.edu.cn

回收净水存在二次污染风险^[17~22],应用于高盐废水处理相关的材料尚未见报道。因此,为实现高盐废水净化和回收利用,亟需设计一种光热转化效率高、污染物吸附性能良好的新型界面光热蒸发材料。

本研究利用含有丰富的—NH₂和—OH等官能团的纤维状结构碳化氮(h-CN)修饰石墨烯(r-GO),通过水热反应制备了新型三维多孔石墨烯复合材料(3D h-CN/r-GO),以硝基苯与苯酚作为模拟污染物,分析了其在高盐条件下对污染物的吸附和光热蒸发性能,以期高盐废水的绿色处理提供一种全新的策略。

1 材料与方法

1.1 实验仪器

集热式恒温磁力搅拌器,DF-101D型(巩义市予华仪器有限责任公司);高速冷冻离心机,D37520 Osterode(杭州宝诚生物技术有限公司);冷冻干燥机,ALPHA1-2 LD plus(北京五洲东方科技发展有限公司);真空气氛管式炉,SKGL-1200C-1200℃(上海钜晶精密仪器制造有限公司);氙灯光源,CEL-HXF300/CEL-HXUV300(北京中教金源科技有限公司);电子天平,ME204E(北京中仪汇丰公司);X射线衍射仪,D/max-RA(日本Rigaku公司);高效液相色谱仪,e2695(Waters);原子吸收光谱仪,ZEEnit 700P(Analytikjena);透射电子显微镜,HT-7700(日立高新技术公司);JEM-2100F场发射扫描电子显微镜;日立UV-310 Shimadzu分光光度计;Labram HR显微拉曼光谱仪;Thermo ESCALAB 250Xi XPS光电能谱仪;FLIR ONE红外热成像仪。

1.2 材料制备

纤维状结构碳化氮(h-CN)的制备:称取20 g尿素,置于坩埚中,在空气气氛下加盖煅烧,于550℃维持2 h,制备得到碳化氮(CN),将样品研磨后备用^[23];称取200 mg高温煅烧所得的CN粉末加入60 mL NaOH(5 mol·L⁻¹)中,在60℃条件下水浴搅拌12 h,弃去上层清液,用蒸馏水洗涤样品,经冷冻干燥后得到纤维状h-CN粉末。

氧化石墨烯(GO):根据改进的hummers法^[24],取100 mL浓H₂SO₄加入到2 g石墨粉和2 g硝酸钠冰水浴中磁力搅拌4 h,缓慢加入12 g高锰酸钾,搅拌24 h,撤冰浴,升温至60℃,加入200 mL去离子水,反应15 min,缓慢加入10 mL的30% H₂O₂至金黄色,冷却至室温,用5% HCl溶液清洗离心,再用去离子水清洗离心,后将所得浆液置于高功率超声下进行剥离,配置成浓度为10 mg·mL⁻¹的溶液待用。

还原氧化石墨烯(r-GO):取5 mL溶液,加入15 mL去离子水,分次缓慢加入100 mg硼氢化钠,超声分散,待溶液仅剩少许气泡,置于80℃条件下水热12 h,冷却至室温,用去离子水清洗离心,配置成浓度为10 mg·mL⁻¹溶液待用。

3D h-CN/r-GO:称取60 mg h-CN粉末加入24 mL r-GO溶液中,超声分散,将上述溶液转移至水热釜中,先在100℃下反应40 min,后升温至180℃保温24 h,反应完成后得三维石墨烯水凝胶,用去离子水反复冲洗,随后对其冷冻干燥,即可获得3D h-CN/r-GO。

1.3 分析方法

污染物检测:硝基苯的测定^[25]采用改进后的高效液相色谱(HPLC),流动相为64%甲醇和36%超纯水,流速为1 mL·min⁻¹,紫外检测波长为254 nm,柱温30℃。苯酚的测定^[26]采用高效液相色谱(HPLC),流动相为80%甲醇和20%超纯水,流速为1 mL·min⁻¹,紫外检测波长为282 nm,柱温25℃。污染物浓度通过标准曲线测定,处理效果用污染物的吸附效率表示,见式(1)。

$$\text{污染物吸附效率} = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, c_0 为吸附前污染物的初始质量浓度,mg·L⁻¹; c_t 为吸附 t 时间后污染物的质量浓度,mg·L⁻¹。

1.4 实验方法

1.4.1 材料表征

使用SEM/TEM观察材料形貌,使用EDS分析材料的复合及元素分布情况,使用XPS分析材料表面各元素形态及成键方式,使用Raman分析材料石墨化程度及材料的复合情况,使用XRD分析材料的物相,使用UV-vis分析材料的光谱吸收范围。

1.4.2 太阳能光热性能测试

实验在室温为20℃,湿度为50%条件下进行。分别投加等量的r-GO、h-CN和3D h-CN/r-GO,调控水中NaCl含量为8%以模拟高盐条件。使用氙灯光源模拟太阳光照射,维持光密度为1 kW·m⁻²。将装置放置于模拟太阳光照下,分别记录0 s、60 s、10 min、20 min和30 min时刻材料的光热成像。

1.4.3 太阳能水蒸发性能测试

本实验在室温为20℃,湿度为50%条件下进行。分别投加等量的r-GO、h-CN、3D h-CN/r-GO,调控水中NaCl含量为8%以模拟高盐条件。使用氙灯光源模拟太阳光照射,维持光密度为1 kW·m⁻²。将装置放置在天平上,一旦模拟太阳光照射到样品上,烧杯中的质量变化立刻在天平上记录下来,水蒸发速率稳定条件下测试60 min。太阳能水蒸发性能由

光蒸汽转化效率(η)进行评估^[27].

1.4.4 污染物吸附实验

以硝基苯和苯酚作为模拟污染物,设置污染物初始浓度梯度为 10、20、30、40、50、100、150、200、250 和 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,控制溶液中 NaCl 含量为 8%,并分别投加等量的 r-GO、h-CN 和 3D h-CN/r-GO 到上述溶液中,在 25℃ 下对比材料对污染物的吸附行为,污染物的吸附容量用 q_e 表示,见式(2).

$$q_e = (c_0 - c_t) \cdot V/m \quad (2)$$

式中, q_e 为吸附容量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; V 为溶液体积,L; m 为材料质量,g.

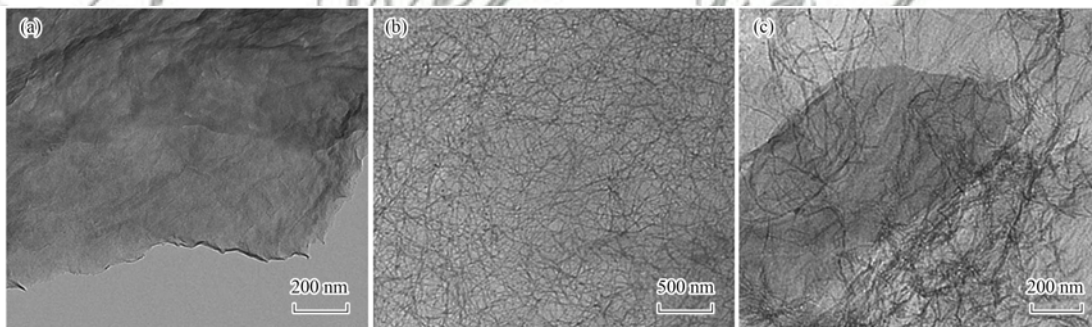
2 结果与讨论

2.1 材料表征

对材料改性前后的形貌采用透射电镜分析,如图 1(a)和 1(b)所示,可以清晰地观察到纯 r-GO 以薄片层形态存在,而纯 h-CN 以纤维状形态呈现,纤维平均尺寸大约在 5~20 nm 左右,大多以单根形式存在,弯曲程度较大、管径较长、分布均匀,相互缠绕形成网络状,此结构特征结合其亲水特性为

复合材料水传输性能的提升奠定了基础.将纤维状结构的 h-CN 与 r-GO 进行复合,改性后的 3D h-CN/r-GO 微观形貌如图 1(c)所示,h-CN 均匀分散在 r-GO 上,且未造成石墨烯的严重凝聚,这可能是由于 h-CN 中含有丰富的 $-\text{NH}_x$ 和 $-\text{OH}$ 等官能团,通过范德华力、氢键等与 r-GO 形成较为稳定的结合.

利用图 2 SEM 图表征了 3D h-CN/r-GO 的多级孔道结构,且孔道分布较为均匀,可为光热界面蒸发提供良好的水传输通道.并利用图 3 元素分布图分析了 3D h-CN/r-GO 的表面元素组成,由图显示该复合材料表面元素主要包括 C、N 和 O,进一步利用图 4 EDS 对 3D h-CN/r-GO 表面元素的相对含量进行了表征,按照原子百分比 C、N 和 O 的相对含量分别为 66.94%、7.45% 和 25.6%;r-GO 表面元素主要为 C 和 O,按照原子百分比相对含量为 90.65% 和 9.35%,由于 h-CN 中含有丰富 $-\text{NH}_x$ 和 $-\text{OH}$ 等官能团,因此 N 和 O 含量均有一定提升,且各元素在复合材料表面分布均匀,进一步说明了 h-CN 与 r-GO 均匀复合.



(a) r-GO; (b) h-CN; (c) 3D h-CN/r-GO

图 1 3 种材料的透射电镜

Fig. 1 TEM images of three samples

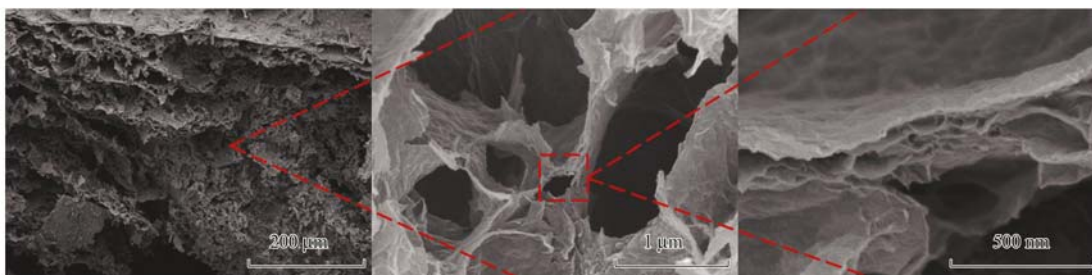


图 2 3D h-CN/r-GO 的扫描电镜图

Fig. 2 SEM images of 3D h-CN/r-GO

图 5 和表 1 分别为 r-GO 和 3D h-CN/r-GO 的 XPS 谱图及其官能团含量比较,可以看出,与 r-GO 相比,3D h-CN/r-GO 由于 h-CN 的掺杂, $-\text{NH}_x$ 和 $-\text{C}-\text{OH}$ 等官能团含量显著升高,已有研究表明,这些官能团会影响材料的亲疏水性以及吸附特性^[28].

为了进一步明确改性材料表面亲疏水性和极性的变化,对 r-GO、h-CN 和 3D h-CN/r-GO 分别进行了接触角测试,由图 6 可观察到纯 r-GO 呈现疏水性,h-CN 呈现良好的亲水性,经改性后的材料 3D h-CN/r-GO,因其内含丰富的官能团而提升了亲水性,这不仅提高了材料对水的输运性能,也提升了材料

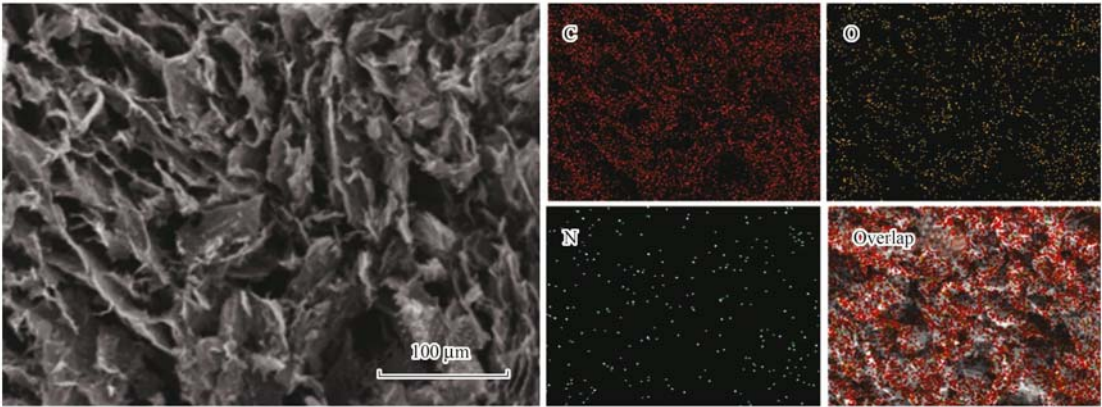
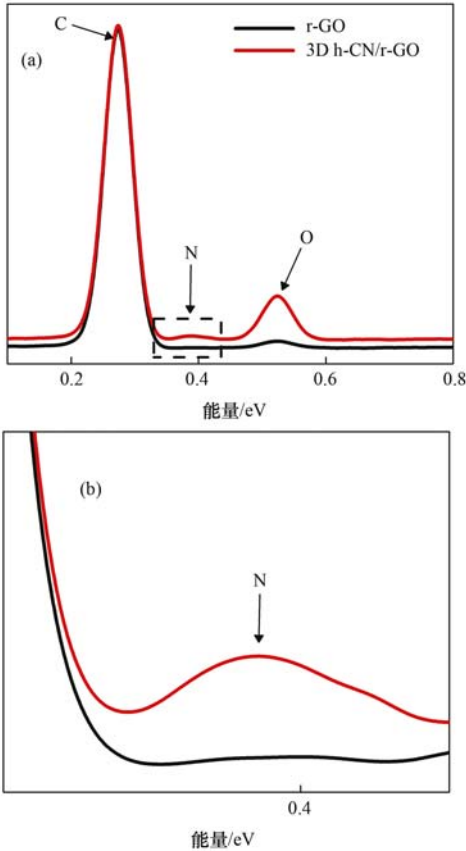


图3 3D h-CN/r-GO 的扫描电镜图和相应 C、N 和 O 的 X 射线能谱图

Fig. 3 SEM image of 3D h-CN/r-GO and the corresponding energy-dispersive X-ray mapping of C, N, and O



(a) C, N, O 能谱分析图；(b) 放大的 N 元素能谱分析图

图4 r-GO 和 3D h-CN/r-GO 的 C、N 和 O 能谱分析图和标记区域的放大图像

Fig. 4 C, N, and O EDS analysis of r-GO, 3D h-CN/r-GO, and the magnified image of the marked region

表1 不同材料中官能团含量比较¹⁾

Table 1 Comparison of functional groups in different materials			
元素	官能团	r-GO	3D h-CN/r-GO
N	—NH _x /峰面积	—	635.92
	—N—(C) ₃ /峰面积	—	1 122.39
	C—N=C/峰面积	—	3 264.39
	—NH _x 含量/%	—	12.66
O	—C—OH/峰面积	7 073.27	26 007.48
	H ₂ O/峰面积	11 720.32	10 062.86
	—C—OH 含量/%	37.64	72.10

1) “—”表示材料中不含对应官能团

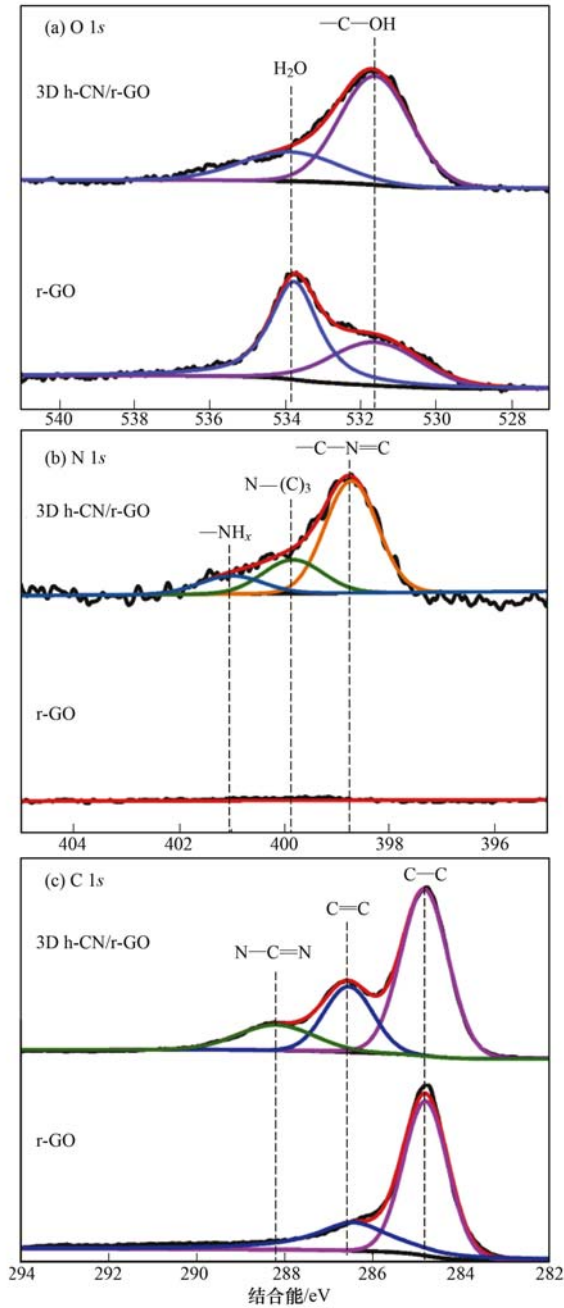


图5 r-GO 和 3D h-CN/r-GO 的 XPS 谱图

Fig. 5 XPS spectra of r-GO and 3D h-CN/r-GO

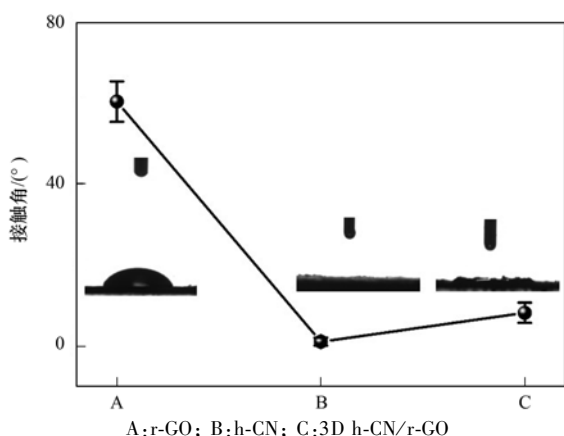


图6 r-GO、h-CN 和 3D h-CN/r-GO 的接触角比较以及相应的接触角测试照片

Fig. 6 Contact angles of r-GO, h-CN, and 3D h-CN/r-GO with the corresponding contact angle images for droplets water on different samples

对不同极性污染物吸附的可能性.

3D h-CN/r-GO、纯 r-GO 和 h-CN 材料的 X 射线衍射图谱见图 7, 纯 r-GO 的衍射峰位置与 3D h-CN/r-GO 基本一致, 而纯 h-CN 中的特征峰并没有在复合材料中被观察到, 这可能是由于掺杂比例较低所致. 材料的拉曼光谱由图 8 所示, 相比纯 h-CN, 纯 r-GO 与 3D h-CN/r-GO 均在 1354 cm^{-1} 和 1590 cm^{-1} 处出现了 D 峰和 G 峰两个拉曼的特征峰^[29], 其中两者的 $I(\text{D})/I(\text{G})$ 分别为 0.35 和 0.36, 这表明两种材料的石墨化程度相仿. 进一步对不同材料的光谱吸收性能进行了测定, 由图 9 可得, 纯 h-CN 在 200 ~ 500 nm 波段有较强的吸收特征峰, 高于 500 nm 波长后的光吸收能力较弱, 纯 r-GO 对于 200 ~ 2000 nm 波长范围内的光均有一个较好的吸收, 而 3D h-CN/r-GO 综合了 h-CN 与 r-GO 两者光谱吸收的特征, 这不仅说明了该复合材料具备宽光谱吸收范围, 同时也证明了材料的有效复合.

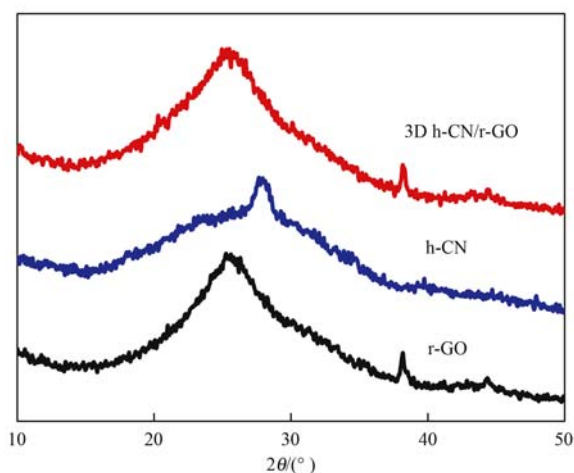


图7 r-GO、h-CN 和 3D h-CN/r-GO 的 XRD 图

Fig. 7 XRD patterns of r-GO, h-CN, and 3D h-CN/r-GO

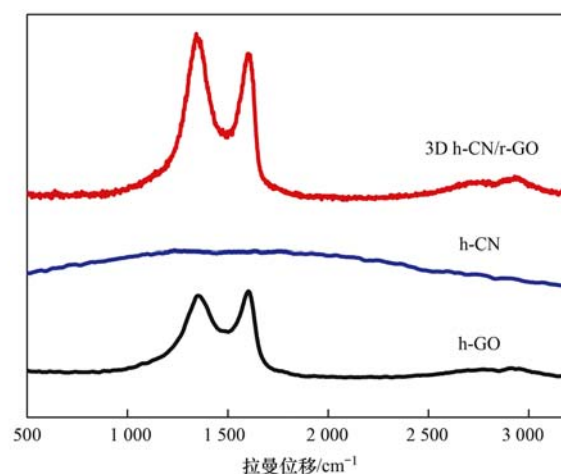


图8 r-GO、h-CN 和 3D h-CN/r-GO 的拉曼图

Fig. 8 Raman spectra of r-GO, h-CN, and 3D h-CN/r-GO

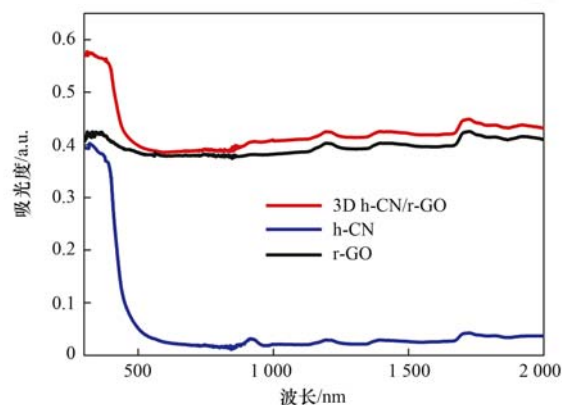


图9 r-GO、h-CN 和 3D h-CN/r-GO 的紫外可见吸收光谱图

Fig. 9 UV-vis absorption spectra of r-GO, h-CN, and 3D h-CN/r-GO

2.2 材料光热性能

良好的光热转化性能可以为材料的界面蒸发提供足够的热量. 图 10 是纯 r-GO、纯 h-CN 和 3D h-CN/r-GO 三者的光热成像图. 从中可知, 纯 h-CN 基本不具备光热转化性能, 20 min 以后瓶体呈现出较弱且均匀的热量, 这主要是由光照本身对水体的加热所致; 纯 r-GO 与 3D h-CN/r-GO 均表现出一定的光热转化性能, 其中, 由于纯 r-GO 均匀分散在水体中, 故体现出对水体的整体式加热, 导致许多不必要的热传导损失, 温度最高仅可达到 60°C , 因而复合材料呈现更快的升温, 且表现出显著的界面加热效果, 光照 30 min 后进行界面水蒸发的同时, 该材料的界面温度仍可达 90°C .

2.3 材料水蒸发性能

样品的水蒸发性能实验在室温为 20°C , 湿度为 50% 的条件下进行, 实验结果如图 11 和图 12 所示. 由于 h-CN 均匀分散在溶液中, 对溶液进行整体式加热, 且材料本身未显示出明显的光热转换性能, 故蒸发速率较低, 仅为 $0.35\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; r-GO 材料

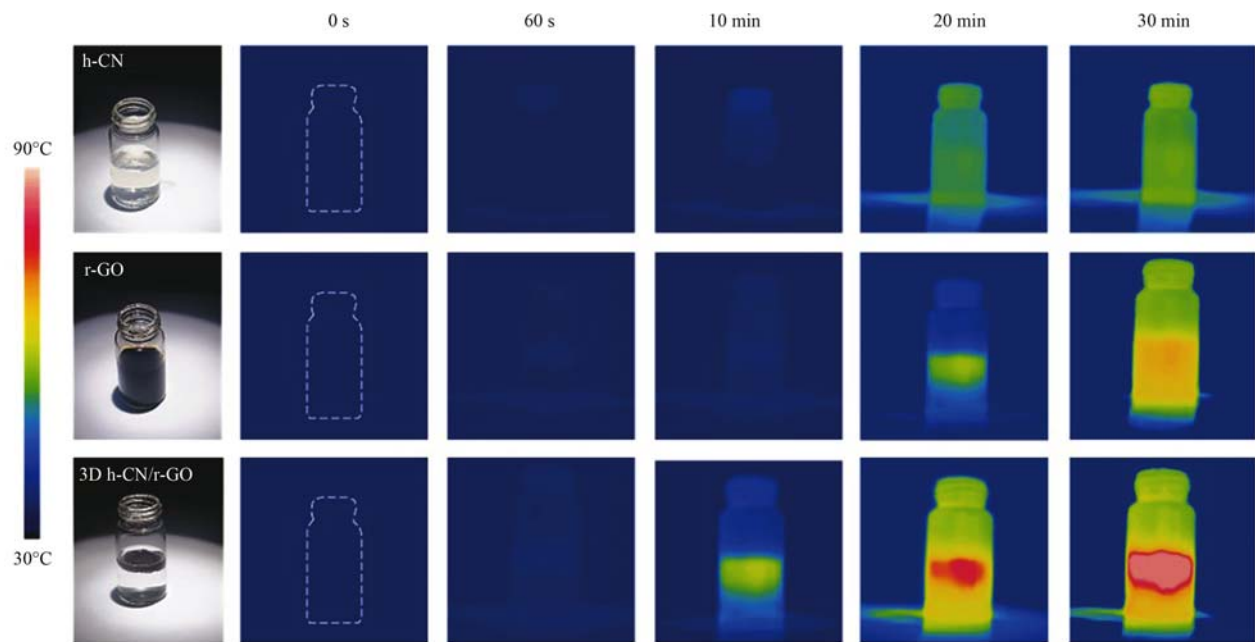


图 10 不同材料在光照 30 min 内的红外热成像图

Fig. 10 Infrared thermal images of different samples under light irradiation within 30 min

的光吸收范围宽,且其本身具备一定的光热转换特性,因而水蒸发速率相比纯水与 h-CN 稍有提升;而复合材料经 h-CN 改性提升了其亲水性,且具备三维多级孔道结构,可实现良好的界面持续水蒸发,在 1 个太阳光强下的水蒸发速率为 $1.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,相比空白提升了 6.6 倍,太阳能光蒸汽转化效率高达 90.4%,此外较目前报道的石墨烯基多孔材料也提升了 30%^[30].

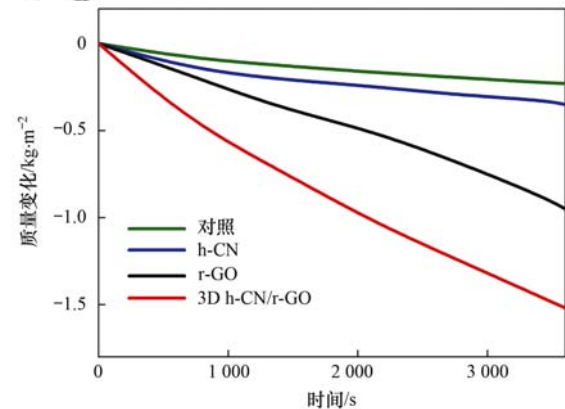


图 11 不同材料单位面积蒸发水量随时间变化

Fig. 11 Time course of evaporation induced water mass changes of different samples

2.4 材料吸附性能

图 13 为纯 r-GO、纯 h-CN 和 3D h-CN/r-GO 在 20℃ 条件下对硝基苯和苯酚溶液的吸附等温线,从中可知,各材料对污染物的吸附量随污染物初始浓度的增大而增大,当初始浓度 $< 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,吸附量随初始浓度的增加快速增大,之后初始浓度再增大,吸附量缓慢增加直至平

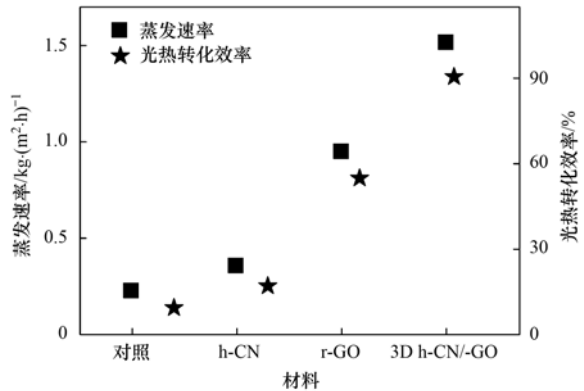


图 12 不同材料的水蒸发速率和光热转换效率

Fig. 12 Evaporation rate and solar thermal conversion efficiency of different samples

衡. 由于 h-CN 含丰富的 $-\text{NH}_x$ 和 $-\text{OH}$ 等官能团,可利用范德华力、氢键等有效提升污染物吸附性能,且所制备的 3D h-CN/r-GO 具备多级孔道结构,进一步提升了复合材料的污染物吸附截留性能,其对硝基苯和苯酚的最大吸附容量分别为 $67.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $57.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

图 14 为各材料对模拟废水中污染物去除效率的比较,可以发现,复合材料对污染物的吸附效果最好,但在处理过程存在一定的竞争作用,对极性较弱的硝基苯的吸附效率较 h-CN 提升了 2.8 倍,对极性较强的苯酚的吸附效率较 r-GO 提升了 2.6 倍. 图 15 为污染物蒸出量随材料吸附量的变化曲线,可知材料对污染物的吸附量越大则污染物的蒸出量少,复合材料可以很好地避免污染物随水体蒸出而引起的二次污染.

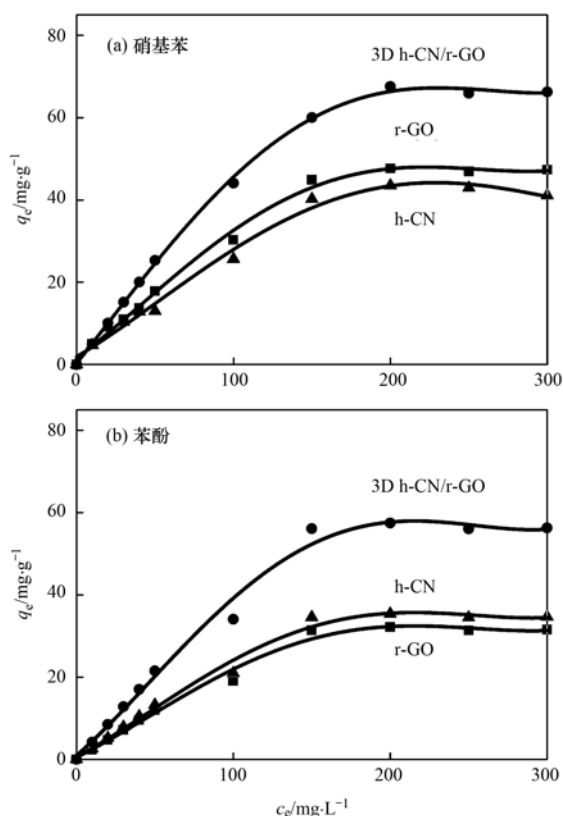


图 13 不同材料对污染物的吸附等温线

Fig. 13 Pollutant adsorption isotherms of different samples

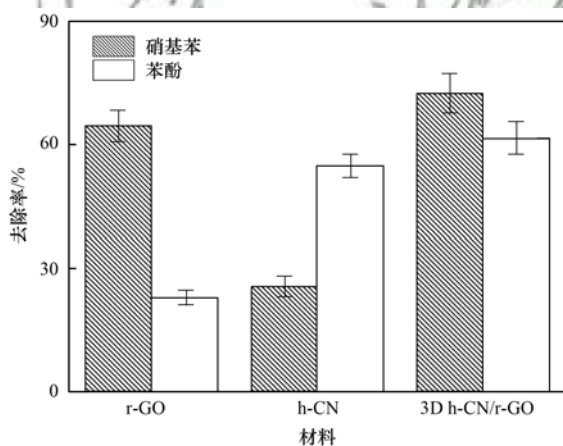


图 14 不同材料对模拟废水中污染物的吸附效率

Fig. 14 Pollutant adsorption efficiency of different materials within simulated wastewater

2.5 界面光热蒸发处理高盐废水

以清洁能源太阳能作为能量输入,可有效实现水资源的可持续回收利用.将制备的 3D h-CN/r-GO 光热转换材料利用界面光蒸汽转化处理高盐含挥发性有机污染物的废水.将材料置于待处理模拟污染废水表面,在光照下可实现光热界面蒸发,持续产生水蒸气,经石英玻璃冷凝成水珠后,实现淡水的回收.图 16 和表 2 为复合材料光蒸汽转化回收水的效率及收集水体中污染物和盐离子浓度检测,由图 16 可得材料具备良好的水传输和光热界面蒸发特性,

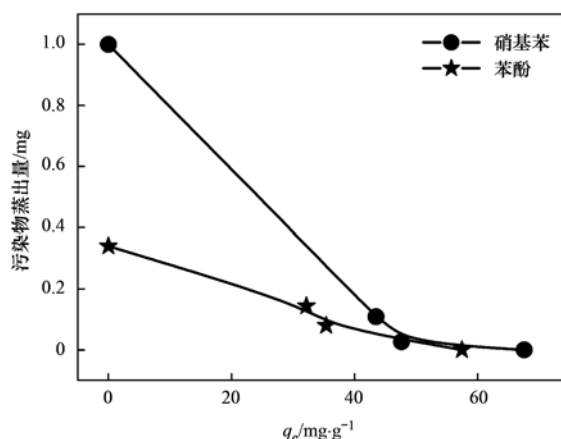


图 15 污染物蒸出量与材料吸附量的关系曲线

Fig. 15 Relation curve between pollutant evaporation amount and adsorption capacities

水体的蒸发速率基本不变,可以实现长时间水的稳定蒸发回收.且冷凝回收的水体中基本无污染物和盐分检出,污染物及盐分截留率高达 98% 左右,苯酚和硝基苯浓度分别为 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)出水排放浓度.

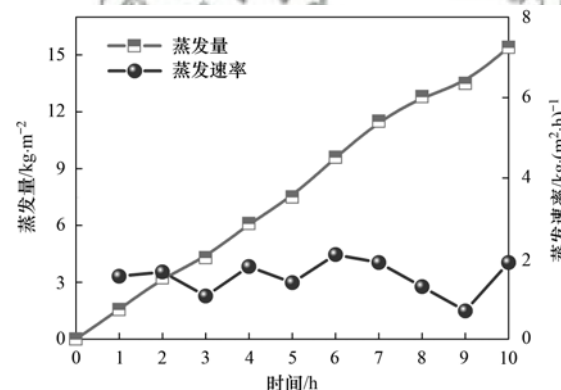


图 16 3D h-CN/r-GO 蒸发水量以及蒸发速率随时间的变化曲线

Fig. 16 Time course of evaporation amount and evaporation rate of 3D h-CN/r-GO

表 2 蒸馏水中污染物及盐离子浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Table 2 Concentration of pollutants and salt ions in the distilled water/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	苯酚	硝基苯	钠离子
初始浓度	52.78	54.00	80 000
收集水中浓度	0.29	1.24	0.15
标准值	0.30	2.00	200

3 结论

(1) 利用纤维状结构的碳化氮(h-CN)修饰石墨烯(r-GO),通过水热反应制备了新型三维多孔石墨烯复合材料(3D h-CN/r-GO),该材料在 $200 \sim 2\,000 \text{ nm}$ 太阳光谱范围内具备良好的光谱吸收特性.

(2) 3D h-CN/r-GO 可实现快速的光热响应,光

照 30 min 后界面温度可达 90℃, 且具有显著的界面光蒸汽转化的效果, 在一个太阳光照条件下水蒸发速率为 $1.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 太阳能光蒸汽转化效率高达 90.4%, 相比纯水提升了 6.6 倍。

(3) 利用 3D h-CN/r-GO 的界面光热蒸发特性处理高盐废水的过程中, 对污染物及盐分截留率高达 98% 左右, 冷凝水体达到污水处理的排放标准, 并且具有长期稳定性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2018.
- [2] 李兴, 勾芒芒, 刘学峰, 等. 高盐废水处理现状及研究进展 [J]. 水处理技术, 2019, **45**(5): 6-10, 14.
Li X, Gou M M, Liu X F, *et al.* Research status and progress on treatment of high-salt wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2019, **45**(5): 6-10, 14.
- [3] 陈富强, 池勇志, 田秉晖, 等. 高盐工业废水零排放技术研究进展 [J]. 工业水处理, 2018, **38**(8): 1-5, 27.
Chen F Q, Chi Y Z, Tian B H, *et al.* Research progress in the zero discharge technology for high-salt industrial wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2018, **38**(8): 1-5, 27.
- [4] 杨振琳, 于德爽, 李津, 等. 海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能 [J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4612-4620.
Yang Z L, Yu D S, Li J, *et al.* Enhanced nitrogen and carbon removal performance of simultaneous ANAMMOX and denitrification (SAD) with trehalose addition treating saline wastewater [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4612-4620.
- [5] Tao P, Ni G, Song C Y, *et al.* Solar-driven interfacial evaporation [J]. Nature Energy, 2018, **3**(12): 1031-1041.
- [6] Yang J L, Pang Y S, Huang W X, *et al.* Functionalized graphene enables highly efficient solar thermal steam generation [J]. ACS Nano, 2017, **11**(6): 5510-5518.
- [7] Zhu L L, Gao M M, Peh C K N, *et al.* Recent progress in solar-driven interfacial water evaporation: advanced designs and applications [J]. Nano Energy, 2019, **57**: 507-518.
- [8] 于永波, 黄湾, 董正玉, 等. N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水 [J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3154-3161.
Yu Y B, Huang W, Dong Z Y, *et al.* Degradation of RBK5 with peroxymonosulfate efficiently activated by N-doped graphene [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3154-3161.
- [9] Zhou X Y, Zhao F, Guo Y H, *et al.* A hydrogel-based antifouling solar evaporator for highly efficient water desalination [J]. Energy & Environmental Science, 2018, **11**(8): 1985-1992.
- [10] Xu N, Hu X Z, Xu W C, *et al.* Mushrooms as efficient solar steam-generation devices [J]. Advanced Materials, 2017, **29**(28): 1606762.
- [11] Wang J, Li Y Y, Deng L, *et al.* High-performance photothermal conversion of narrow-bandgap Ti_2O_3 nanoparticles [J]. Advanced Materials, 2017, **29**(3): 1603730.
- [12] Ye M M, Jia J, Wu Z J, *et al.* Synthesis of black TiO_x nanoparticles by Mg reduction of TiO_2 nanocrystals and their application for solar water evaporation [J]. Advanced Energy Materials, 2017, **7**(4): 1601811.
- [13] 邓曹林, 王京刚, 王颖, 等. 石墨烯改性 Al-MCM-41 介孔分子筛负载铁芬顿催化剂降解苯酚 [J]. 环境化学, 2015, **34**(6): 1185-1192.
- [14] Deng C L, Wang J G, Wang Y, *et al.* Fenton catalytic degradation of phenol by using iron-loaded graphene modified mesoporous Al-MCM-41 catalyst [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(6): 1185-1192.
- [15] Liu K K, Jiang Q S, Tadepalli S, *et al.* Wood-graphene oxide composite for highly efficient solar steam generation and desalination [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, **9**(8): 7675-7681.
- [16] Liu D, Tai T, He Y R. Solar heated graphene-melamine foam for absorbing oil and organic solvents [J]. Energy Procedia, 2019, **158**: 490-496.
- [17] Li J L, Du M H, Lv G X, *et al.* Interfacial Solar steam generation enables fast-responsive, energy-efficient, and low-cost off-grid sterilization [J]. Advanced Materials, 2018, **30**(49): 1805159.
- [18] 晋圣跳, 向阳, 张隽瑀, 等. 2, 6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb^{2+} [J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4091-4097.
Jin S Y, Xiang Y, Zhang J Y, *et al.* Intensified electrosorption of Pb^{2+} by 2, 6-diaminoanthraquinone/graphene composite electrode [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4091-4097.
- [19] Zhang P P, Li J, Lv L X, *et al.* Vertically aligned graphene sheets membrane for highly efficient solar thermal generation of clean water [J]. ACS Nano, 2017, **11**(5): 5087-5093.
- [20] Yousefi N, Lu X L, Elimelech M, *et al.* Environmental performance of graphene-based 3D macrostructures [J]. Nature Nanotechnology, 2019, **14**(2): 107-119.
- [21] Ito Y, Tanabe Y, Han J H, *et al.* Multifunctional porous graphene for high-efficiency steam generation by heat localization [J]. Advanced Materials, 2015, **27**(29): 4302-4307.
- [22] Cui L F, Zhang P P, Xiao Y K, *et al.* High rate production of clean water based on the combined photo-electro-thermal effect of graphene architecture [J]. Advanced Materials, 2018, **30**(22): 1706805.
- [23] 蔡亭伟, 丁颖, 徐丽慧. 三维石墨烯材料在污水处理中的研究进展 [J]. 环境化学, 2018, **37**(6): 1282-1292.
Cai T W, Ding Y, Xu L H. Development of 3D graphene material in wastewater treatment [J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(6): 1282-1292.
- [24] Feng H J, Guo Q Q, Xu Y F, *et al.* Surface nonpolarization of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ by decoration with sensitized quantum dots for improved CO_2 photoreduction [J]. Chemosuschem, 2018, **11**(24): 4256-4261.
- [25] 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 等. 石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙 G [J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2202-2210.
Xia W J, Liu F, Hao S B, *et al.* Degradation of OG with peroxymonosulfate activated by a MnFe_2O_4 -graphene hybrid [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2202-2210.
- [26] Gu D, Shao N, Zhu Y J, *et al.* Solar-driven thermo- and electrochemical degradation of nitrobenzene in wastewater: Adaptation and adoption of solar STEP concept [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **321**: 703-710.
- [27] Zhang K F, Liu Y X, Deng J G, *et al.* Co-Pd/BiVO₄: high-performance photocatalysts for the degradation of phenol under visible light irradiation [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, **224**: 350-359.
- [28] Zhu L L, Gao M M, Peh C K N, *et al.* Self-contained monolithic

- carbon sponges for solar-driven interfacial water evaporation distillation and electricity generation [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, **8**(16): 1702149.
- [28] Ataman E, Andersson M P, Ceccato M, *et al.* Functional group adsorption on calcite: II. Nitrogen and sulfur containing organic molecules[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, **120**(30): 16597-16607.
- [29] Noor T, Zaman N, Nasir H, *et al.* Electro catalytic study of NiO-MOF/rGO composites for methanol oxidation reaction [J]. *Electrochimica Acta*, 2019, **307**: 1-12.
- [30] Liu G H, Xu J L, Wang K Y. Solar water evaporation by black photothermal sheets[J]. *Nano Energy*, 2017, **41**: 269-284.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2019年11月19日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续18次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

环境科学

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)