



全国中文核心期刊

中国科技核心期刊

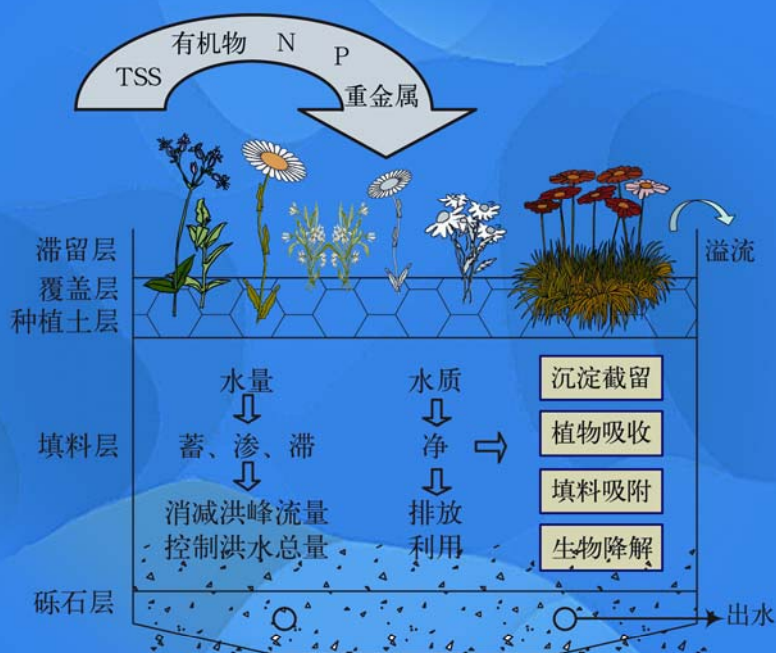
环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

封面文章

雨水生物滞留系统控制径流污染物研究进展

仇付国, 陈丽霞. 2016, 10(4): 1593-1602



中国科学院
生态环境研究中心

主办



科学出版社

出版

Vol. 10 No. 4

2016.4

目 次

综 合 评 述

新型材料碳纤维在水处理应用中的研究进展	张小玲	王靖楠	施雪漪	林 燕	王欣泽	孔海南(1577)
燃煤烟气中多种污染物干法同时脱除研究进展			马丽萍	王倩倩	唐剑骁	马贵鹏(1584)
雨水生物滞留系统控制径流污染物研究进展					仇付国	陈丽霞(1593)

水 污 染 防 治

悬浮和附着活性污泥反应器处理低温废水的特性比较	周 律	彭 标	邢秀娟(1603)
一种基于脱氮和除磷分开的强化污染物去除组合工艺中试研究			
..... 杨世东 刘锦伟 刘志国 王培京 郭雪松 肖本益 刘俊新(1609)			
纳米 TiO ₂ 光催化-超滤法处理模拟二级出水	王旭东	唐 婧	王 磊 黄丹曦 夏四清(1615)
异养硝化-好氧反硝化粪产碱杆菌处理高氨氮污泥厌氧消化液	李建华	刘文静	高桥润一 正田诚 李 宁(1621)
细微泥沙粒径对活性污泥产率的影响及其计算公式			吉芳英 来铭笙 何 莉 周卫威(1627)
臭氧催化氧化去除水中聚乙烯醇	谭万春	谢 鹏	孙士权 王云波 聂小保 万俊力 禹丽娥(1633)
铜改性活性炭纤维高效吸附去除对苯醌	李国亭	冯艳敏	柴晓琪 刘二明 王庆同 张 昊(1638)
饱和膨润土复合颗粒吸附剂吸附的重金属离子的固定及其再生			肖丽萍 耿莘惠 裴 格(1645)
基于铝盐混凝污泥的新型 LCFM 吸附性能评价	王文东	张银婷	周礼川 蒋云龙 王洪平 丁真真(1651)
高性能二氧化铅电极制备及降解邻甲酚			王 炼 张钱丽 王东田 魏 杰(1657)
组合工艺处理猪场废水中试实验研究			赵雅光 蔡利芳 万俊锋 彭 凯 王 岩(1665)
铁表面改性石英砂去除混凝出水中的 Cr(VI)	穆丹琳	徐 慧	耿 欣 肖 峰 王东升 段晋明(1674)
天津市某污水处理厂脱氮效率的评价			张 羽 孙力平 钟 远(1681)
生活污水 PVA 生物处理工艺			王丽娜 刘永红 闫爱军 刘 磊 李佳凤(1688)
硅质壳及硅藻土对亚甲基蓝吸附性能比较			王丰喜 倪佩军 刘张敏 邓湘云(1693)
陶瓷膜处理含镍电镀废水	张金斌	曾坚贤	张学俊 申少华 喻 谢 钱朝辉 张 鹏 田 俊(1699)
季节气温变化对潜流人工湿地处理效果的影响			张彩莹 杜瑞卿 王 岩(1706)
pH 对混凝超滤组合工艺性能的影响			童少磊 孙 昕 陈益清 尹 娟(1713)
焙烧镁铝水滑石的制备及其对水中 Cl ⁻ 和 SO ₄ ²⁻ 的吸附特性			
..... 李春艳 蒋云福 赵 俊 方 超 沈跃跃 赵仕林(1719)			
模拟太阳光协同三维电极/电 Fenton 降解甲基橙			
..... 刘钰鑫 喻泽斌 彭振波 项国梁 孙玲芳 龚祝清 朱 洁 苏丹丹 刘 源(1727)			
多孔载体中微型动物与原位剩余污泥减量的相关性			隋海然 李宏君 巢云龙 董 慧 林山杉(1735)
赋硫活性炭对 Cr(VI) 的吸附机理			杨宝滋 毛 磊 朱小涛 李振昌(1740)
Box-Behnken 响应面分析法对双阳极电 Fenton 法处理垃圾渗滤液工艺的优化			
..... 祝 方 李璐玮 程 畅 万 鹏 任腾飞(1749)			
微纳曝气技术对城市景观水体修复的影响	陆 晖	胡湛波	蒋 哲 刘恺华 杨珣蒙 谢欣好(1755)
复合混凝剂(PFC-PDMDAAC)混凝性能与应用研究			任宏洋 何 敏 王 兵 张 聪(1761)
悬浮填料缺氧成膜过程及其强化 TN 去除效能	徐 巧	张光生	谭 阳 王 硕 李 激(1769)
蒸发法处理不同填埋龄垃圾渗滤液中的有机物			李济源 程振杰 张 明 曹文平(1777)
CMC/NI 复合材料净化水中的 As(Ⅲ)	张晓华	周 华	张水丽 卢泽湘 海热提 范立维(1783)
稀土冶炼过程草酸沉淀废水资源化处理技术			杨 帆 晏 波 权胜祥 李 宁 张 乐(1789)
SBBR 工艺硝化过程中 DO 对 N ₂ O 产生量的影响			葛光环 赵剑强 高 坤 陈爱侠 黄 楠(1794)
基于三角随机模拟和 ArcGIS 的河流水环境健康风险评估模型			
..... 陈耀宁 智国铮 袁兴中 梁作显 曾光明 江洪炜(1799)			
香蕉皮改性吸附剂对氨氮吸附特性			董建丰 平 巍 张六一 倪 斌 付 川(1807)
Ag-石墨烯的制备及修饰电极对对苯二酚的电催化氧化			齐亚娥 徐 斌 任雪峰(1813)
热解柚子皮吸油材料的制备及性能	刘 钊	文 明	刘 洋 黄爱萍 李 厚 万 富 柳阿芳(1818)
改性木屑吸附除亚甲基蓝性能			
..... 任丹丹 丁文明(1823)			
沉淀回流对石灰软化法去除地下水硬度的影响			赵月兰 鄢 琳 吴城锋 杨 宏(1829)
臭氧/微电解工艺对 8 种染料单独及混合配水的处理效能	董 蛟	董文艺	张先炳 杨 浩 王宏杰(1835)
半焦吸附养殖废水中的重金属			廖玉华 程群鹏 邓 芳 肖 波(1842)
不同铝系混凝剂处理印染废水			郭 玥 杜 磊 李 庆 徐 慧(1847)
钢渣催化剂处理难降解有机废水			尹述伟 高 博 陈向明(1853)

大 气 污 染 防 治

Fe ₂ O ₃ /TiO ₂ /γ-Al ₂ O ₃ 催化剂同时脱硫脱硝性能	任晓光	刘怡宁	张倩楠	田晓良(1857)
基于 PSO-LSSVM 算法的工业废气净化装置电源参数预测模型		荀 倩	王培良	蔡志端(1863)

用数值模拟方法研究含硫颗粒物生成过程	郭兴明	邢亚平 (1869)
贵阳市白云区大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染特征	魏华炜 罗绪强 廖晶晶 罗光杰	彭庆康 (1874)
基于集成神经网络的汽车尾气检测系统设计	刘 萍	简家文 陈志芸 (1883)
双鸭山电厂 SCR 脱硝反应器结构优化的数值仿真分析	王汉青 李福强 李端茹 叶明强 刘畅荣 易 辉 李铖骏	易检长 (1888)
稀土元素对生物塔烟气同时脱硫脱氮的强化作用	魏中华 孙珮石 邹 平 毕晓伊 姜 阅 任洪强	王艳茹 (1893)
2013 年北京市臭氧时空分布及预报	贾海鹰 孟 凡 柴发合 李红霞 李 红	张永锋 (1900)
常温常压下采空区遗煤对电厂烟气的吸附	高 飞 邓存宝 王雪峰	戴凤威 武司苑 (1907)
不同后整理工艺方法对袋式除尘器滤料过滤性能的影响	刘兴成	沈恒根 (1913)
修饰金电极对甲烷的电催化氧化	张利琴 张 彦	董 川 (1919)
北京市交通干道空气中 CO ₂ 和 δ ¹³ C 变化及来源分析	孙守家 舒健骅 丛日晨 郑 宁	何春霞 (1924)
不同过滤介质对 PM _{2.5} 过滤性能与效果	吴夏雯	陆 茵 (1933)
预处理对 CNTs 低温催化氧化 NH ₃ 性能的影响	唐晓龙 李 东 王文勤 易红宏 马 玓 张波文	高风雨 (1939)
SNCR 的喷雾与混合过程及其对脱硝效率的影响	袁淑霞 樊玉光	胡宇波 (1945)
超高温烟尘过滤陶瓷滤料的制备	徐泽丰 崔 荣	金 江 (1951)
静电除尘器气流分布数值模拟		纪世昌 (1956)
入口速度对静电 monolith 过滤器通道过滤性能的影响	李洪根	吴国江 (1961)

固体废物处理与处置

用电石渣、钢渣和煤矸石制备可控性低强度材料	张 骏 兰思杰 李 阳 罗安然	赵由才 (1967)
温度和水蒸气流量对烟秆高温气化的影响	田 甜 李清海 李文妮 何 榕	张衍国 (1973)
纤维素酶添加时间对碱性双氧水预处理玉米秸秆高温厌氧消化的影响	吴 丹 张盼月 金曙光 樊世漾 李 藩	李东一 (1979)
玉米秸秆滤料对猪粪发酵沼液过滤效果	张智烨 李国学 袁 京 孙巧萍 罗 洲	张地方 (1985)
盐酸林可霉素菌渣的厌氧处理可行性静态实验研究	董焕成 买文宁 李海松	刘伟鹏 (1993)
沼气增温与控制系统的设计与仿真	常 婧 任绳凤	李宪莉 (1997)
高温微生物菌剂加速垃圾填埋场好氧稳定化进程的研究	夏向利 唐和清 杨子陆 王继勇	林 卓 (2003)
土霉素对剩余污泥中温厌氧消化的短期和长期影响	余 博 田 哲 池勇志 张 昱	杨 敏 (2009)
共固定化酶对反胶束体系油酸酯化的催化条件优化	包 姗 袁兴中 彭 馨 刘 欢	马玉洁 曾光明 (2016)
枯草芽孢杆菌液态发酵降解茶皂素	刘以清 肖 瑜 覃 妍 唐 沈	黄 浦 张丽丽 (2023)
稻壳对多孔氮化硅陶瓷制备的影响	荆 涛 许晓敏	郭 伟 (2031)
初始含水率及固结特性对湿法磷石膏堆场渗滤液产量的影响	蒙明富 仲 蔚 刘 宁	姜 平 (2035)
印染污泥连续过滤压榨过程	刘丽艳 仲 宽 谭 蔚	冯国红 (2041)
垃圾焚烧飞灰的石材化固化处理	姜正平 宋旭艳 周展钊 何耀晖	明 维 (2046)
金属离子强化餐厨垃圾高温厌氧发酵产酸	王艳琴 张 洁	赵晨曦 刘月娥 (2051)

土壤污染防治

改良剂对土壤 Cu 形态转化及其生物可给性的影响	李 季 黄益宗 胡 莹 金姝兰 保琼莉 王 斐 向 猛	李晓敏 (2057)
冶炼厂周边表层土壤重金属关联特征及污染评价	王成军 冯 涛 赵舒婷 任洋明	刘 勇 (2064)
含水层介质对 Cr(VI) 的吸附特征	李 银 刘 瑜	李昌乐 (2071)

环境生物技术

嗜盐杆菌 HSQAY1 对中肋骨条藻的溶藻物质特性	黄 珺 黄洪辉 吴风霞 戴 明	齐占会 (2077)
不同培养模式对钝顶螺旋藻生长和固碳速率的影响	李 安 徐 倩 任洪艳	阮文权 (2083)

生态修复工程

基于熵权-集对分析的多级生态塘功效综合评价	王高骏 王晓昌 刘言正	宋 佳 (2093)
人工湿地宽叶香蒲对重金属的累积与机理	李 冰 舒 艳 李科林 宋金凤 聂文博	汤春芳 (2099)
构筑根孔湿地夏季浮游植物群落结构特征	王宝玲 王丽卿 张 玮	王为东 (2109)

环境监测技术

基于紫外吸收原理的硝酸盐在线监测传感器研制及应用	孙 浩 郭 慧 赵 辉 王 勤 戚海燕	金庆辉 (2122)
三维荧光光谱评价污水处理厂 COD 去除效率	帅 磊 李卫华 申慧彦	杨 琳 (2127)
地下水中潜在危害有机物识别与筛选方法	曾 颖 何江涛	马文洁 (2132)
碰撞池-电感耦合等离子体质谱测定海水重金属	王 静 王 鑫 耿 哲 赵 一	王 斌 (2139)

工程应用实例

CLR + 立式 A/O-MBR 组合工艺处理垃圾渗滤液的工程实例	沈 鹏 黄振兴 肖小兰 缪恒锋 赵明星 任红艳	阮文权 (2144)
城市生活垃圾焚烧飞灰与矿山废水共处置技术研究与工程应用	孙福成 丁慧敏 柯 伟 张佳萍 张玉环 孙 璐	(2151)

新型材料碳纤维在水处理应用中的研究进展

张小玲¹ 王靖楠¹ 施雪旖² 林燕^{2*} 王欣泽² 孔海南²

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064; 2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要 随着水环境污染问题的日趋严重, 污水治理问题备受关注。碳纤维材料因其具有较大的比表面积和良好的生物亲和性, 易于微生物附着, 利于吸附、生物脱氮除磷的进行, 从而去除水中氮磷等污染物, 在水处理中具有应用前景。系统介绍了碳纤维材料的发展历程及其在工业等领域的应用, 对碳纤维材料高强度、耐高温、耐腐蚀等特性进行了总结, 重点介绍了碳纤维材料在饮用水、工业废水及富营养化水体等水处理中的应用, 同时结合目前的研究现状, 分析了将来研究的开展方向及趋势。

关键词 碳纤维 水处理 富营养化 吸附 脱氮除磷

中图分类号 X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2016)04-1577-07

Research progress of new material carbon fiber in water treatment applications

Zhang Xiaoling¹ Wang Jingnan¹ Shi Xueyi² Lin Yan² Wang Xinze² Kong Hainan²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract As water pollution becomes increasingly problematic, more attention has been paid to sewage treatment. A fiber material offers promise in water treatment because it has a large specific surface area and good biological compatibility, which allows microorganisms to easily adhere to the material and, accordingly, favors the adsorption and removal of nitrogen and phosphorus. In this study, the development of a carbon fiber and its applications are introduced, and the properties of the carbon fiber, such as high intensity, thermostability, and corrosion resistance, are summarized. The applications of carbon fiber materials to the treatment of drinking water, industrial wastewater, and eutrophied water are introduced, and future research and trends are analyzed.

Key words carbon fiber; water treatment; eutrophication; adsorption; denitrification and phosphorus removal

湖泊富营养化问题日益严重, 低污染水因其污染具有长期性被视为湖泊水污染的重要污染源之一^[1]。低污染水的污染物浓度低、水量大且水质不稳定, 传统的水处理工艺较难满足要求。如何更好地实现低污染水的治理是目前学者们关注的焦点之一。

碳纤维材料具有发达的表面微孔结构及良好的生物亲和性, 利于微生物附着生长, 可以通过表面附着微生物的生物脱氮除磷作用去除水中的污染物^[2]; 碳纤维材料有较大的比表面积, 可以通过吸附作用去除水中溶解态污染物^[3]; 此外, 碳纤维表面含有一OH、—C=O、—COO等官能团使碳纤维具有表面活性, 利于与其他物质结合^[4], 因而受到学者们的关注。碳纤维是有机纤维在1 000℃以上的高温下炭化, 且含碳量在90%以上的高性能纤维增强材料, 是继粉状活性炭和颗粒活性炭之后的第三代活性炭产品^[5]。碳纤维与粉状活性炭、颗粒活

性碳等碳材料相比, 孔径分布狭窄且均匀, 对水溶液中的有机物和重金属离子等有较大的吸附容量和较快的吸附速率, 对低浓度吸附质仍保持有较高的吸附量。另外, 还可根据需要加工成纤维束、毡、布等形态, 便于工程应用和工艺的简化^[6]。因此, 碳纤维在水处理中的应用具有较为广泛的前景。

1 碳纤维的发展历程及性能

1.1 发展历程及应用

早在1959年, 美国联合碳化物公司出于军事目

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07105-003); 国家自然科学基金资助项目(51408041)

收稿日期 2014-12-06; **修订日期** 2014-12-30

作者简介 张小玲(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事污水处理与回用研究。E-mail: zhangxiaoling101@126.com

* 通讯联系人, E-mail: linyansjtu@126.com

的首次研发生产出低模量黏胶基碳纤维,试图通过该材料制造质轻强度高的军事装备,但该材料抗压、抗拉能力较低;同年,日本研究人员发明了用聚丙烯腈基原丝制造碳纤维的新方法,应用该方法生产出的碳纤维比黏胶基碳纤维具有较高的抗拉、抗压能力^[7]。随后,美国、日本等国家陆续研发出了沥青基碳纤维、波纹状碳纤维,开拓了生产碳纤维原材料的选择范围,并在原有碳纤维的形态上做了改进,提高了碳纤维的弹性^[8]。后期以日本为主的各国家为提高碳纤维弹性模量和抗张强度继续进行研究。至此以来,有关活性碳纤维的研究及生产技术日趋成熟,已经形成了以黏胶基、沥青基和聚丙烯腈基为主的三大原料体系的碳纤维。

目前碳纤维除用于高温绝热材料及消除静电刷子外,主要用作复合材料中的增强材料^[9-11],用于航空、航天、工业应用和体育用品三大领域^[12]。碳纤维复合材料因其比强度及比模量高、耐腐蚀、质量轻等特点,成为飞机、导弹、运载火箭、人造卫星等结构上不可缺少的基础材料;此外,碳纤维材料在电子、化学、冶金、石油、机械、纺织等工业领域具有相当广泛应用;另外,碳纤维材料的吸附性能好,可用于水处理、气体吸附处理^[13-17],在环保领域具有一定的应用价值。

1.2 碳纤维的性能

碳纤维具有高强度、高模量、低密度等优良特性^[18],此外还有如下特点^[19]:(1)耐高温,可在 2 000 ℃使用,3 000 ℃非氧化环境中不熔不软;(2)抗化学腐蚀,能耐浓盐酸、硫酸、磷酸、苯、丙酮等介质的浸蚀;(3)热膨胀系数小,约等于零;(4)热导率高,约为 10 ~ 140 W/(m · K);(5)摩擦系数小、导电性好。此外碳纤维的柔曲性、比强度和比模量均优于其他纤维增强体。

碳纤维除了具有以上共性外,由不同原料制成的碳纤维有各自的特点。不同原料碳纤维特点见表 1^[20-21]。

此外,碳纤维在催化、吸附方面具有良好性能,与其孔结构、孔分布、比表面积等特性有关^[22]。通过结构模型比较碳纤维和活性碳的表面形态及孔结构,碳纤维表面分布有微孔,而活性碳微孔分布在材料内部,碳纤维材料的吸附质扩散路径短,具有更快的吸附效率;填料之间比表面积比较,弹性立体填料为 0.03 m²/g^[23],生物绳填料为 0.05 m²/g^[24],活性碳为 800 ~ 1 000 m²/g,碳纤维为 1 000 ~ 2 000 m²/

g,最大可达 3 000 m²/g^[25],说明碳纤维具有较高的比表面积,吸附量较大。

表 1 不同原料碳纤维的特点比较
Table 1 Comparison of characteristics of different materials of carbon fiber

种类及特性	黏胶基	沥青基	聚丙烯腈基
比表面积(m ² /g)	1 000 ~ 1 500	1 000 ~ 2 000	700 ~ 1 200
抗张强度(MPa)	70 ~ 100	100 ~ 180	200 ~ 500
弹性模量(GPa)	10 ~ 20	4 ~ 6	70 ~ 80
其 他	原料价格低、制作工艺复杂	原料价格便宜、深加工困难	对硫、氮系化合物有催化作用,吸附性能好

2 碳纤维在水处理中的应用

20 世纪 90 年代初,日本学者的意外发现,推开了碳纤维材料在水处理应用的“惊喜之门”。经过日本学者的多年研究发现,碳纤维具有吸附大量微生物的功能。群馬高等专科学校物质工学科的特聘教授小岛昭,是最早研究该课题的专家。他将碳纤维和其他材料等放入活性污泥中,1 d 后发现碳纤维容器内活性污泥减少,其他没有减少;碳纤维质量由 0.3 g 增加到 30 g,其他材料无变化。继续添加活性污泥,发现碳纤维材料上附着生物膜增长速度最快、质量变化最大,是难以剥离的活性生物集聚团,同时可以快速捕捉浮游悬浊物,形成良好的生物链^[26]。碳纤维为微生物提供挂附场所,附着在碳纤维上的微生物群形成生物膜,将污染物质分解。

日本奈良县、群馬县藤冈市等地分别以受污水体作为实验对象^[26],应用碳纤维接触材料净化水质,实验结果均表明,碳纤维对水中悬浮物去除率为 50% ~ 60%、对 COD 去除率在 50% 左右、对 BOD 去除率为 47% ~ 50%、对 TN 有良好的去除效果,同时提高水体透明度、降低色度。日本稚内、本州等地利用碳纤维对海洋藻场进行恢复,治理水环境的同时促进了当地水环境生态多样性恢复及水质净化^[27]。蒲生孝治^[28]研究了碳纤维织物对校园池塘水的净化效果,对水体温度、pH、COD 和 BOD 进行检测,结果显示,COD 值由 6 ~ 8 mg/L 降至 4.5 mg/L、BOD 值由 3.5 mg/L 降至 1.5 mg/L。张鹏^[29]在 5 个不同气水比条件下比较了碳纤维、无纬布和辫带式超细纤维对 NH₄⁺-N 和 COD 的去除效果。随着气水比的增加,3 种材料对 NH₄⁺-N 的去除效果也增加,当气

水比分别达到 3.5 和 2.5 时, COD 的去除效果达到最佳。在相同的平衡浓度下, 碳纤维对 NH_4^+-N 和 COD 的去除效果优于另外两种材料。余帆洋等^[30]通过自行设计的选择培养基对碳纤维上面优势菌群的种类和数量做了鉴定分析, 说明碳纤维上存在多种硝化细菌和反硝化细菌, 从机理上证明了碳纤维可用于水质净化。

综上所述, 碳纤维可以通过自身吸附过滤和生物膜吸附降解污水中的有机物、氮等物质, 同时促进生态系统生物多样性恢复^[31]; 可以加速污水处理中活性污泥的生长^[32], 通过活性污泥微生物的代谢活动, 氧化分解污水中的有机物得以净化水质。因此, 应用碳纤维材料及附着于碳纤维上的微生物可以进行水污染治理。

2.1 应用碳纤维进行饮用水净化

随着环境污染日益严重, 饮用水的安全问题倍受重视。碳纤维作为一种新型净水材料引起关注。碳纤维材料具有较大的比表面积和孔体积, 与水体接触面积大, 吸附能力强, 可以吸附水中污染物质; 此外, 碳纤维材料表面羧基、羟基等含氧官能团的存在^[33-34], 对去除水中有机污染物有一定作用。因此, 利用碳纤维有助于去除水中污染物质。

孙治荣等^[35]研究发现, 碱性活化改性或未改性的碳纤维对水源地水体中有机污染物有一定的去除效果, COD、 CHCl_3 的去除率分别为 25% ~ 45% 和 80%, 有机物的初始去除率基本达到 100%, 后随处理水量增加而下降, 使用碳纤维进行水质净化可以降低水体的浊度、色度及毒害性。桑松表^[34]研究了碳纤维对饮用水中卤乙酸、二氯乙酸和三氯乙酸的吸附特性和效果, 发现在相同投加量下, 碳纤维对二氯乙酸和三氯乙酸的吸附效果明显好于粗粒活性炭, 去除率分别可达 82.58% 和 100%, 粗粒碳纤维对二氯乙酸和三氯乙酸的去除率不到 60%; 碳纤维对卤乙酸的吸附量与其比表面积大小有关且呈正比例关系。

2.2 碳纤维对工业废水的处理

碳纤维除在饮用水净水方面的应用外还广泛应用于造纸、印染、制药、化工等工业废水的处理以及重金属的去除和回收^[6]。目前研究表明, 碳纤维对于印染废水、难降解有机废水、焦化废水等污水处理具有效果, 可以吸附去除水中染料、有机物等物质。

李颖等^[36]研究了碳纤维对 4 种活性染料的吸附性能, 结果表明, 碳纤维对 4 种染料的平衡吸附量

均随着初始浓度和温度的增加而升高, 吸附过程以物理吸附为主。魏永前^[37]对碳纤维膜生物反应器处理难降解有机废水进行了研究, 结果表明, 处理造纸废水时, 当 COD 含量在 800 ~ 1 000 mg/L 时, COD 的去除率可达 88%。张培等^[38]应用活性炭纤维吸附处理模拟焦化废水尾水, 研究表明, 活性炭纤维对苯酚的吸附量最大为 107.11 mg/g, 随温度升高吸附效果降低。

Zaini 等^[39]研究了聚丙烯腈基碳纤维去除水溶液中的重金属的可行性, 结果表明, 聚丙烯腈基碳纤维对 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 去除性能好于其他的商业碳纤维。Tang 等^[40]采用碳纤维序批式处理系统吸附去除模拟废水中的对硝基苯酚, 研究了碳纤维对对硝基苯酚的吸附机理和最佳的吸附条件, 发现对硝基苯酚的初始浓度为 1 000 mg/L, pH 4.3, 碳纤维用量 4.00 g/L、温度 19.8 °C 时吸附效率为 98.75%, 平衡吸附量为 247.85 mg/g, 效果非常理想。Wang 等^[41]以活性炭纤维为载体材料构成新型催化装置, 可以通过吸附富集和催化氧化作用去除水中有机污染物, 实现水体净化, 为处理工业污染废水提供了新方法。

2.3 碳纤维对富营养化水体的处理

碳纤维是一种新型吸附剂材料, 其丰富的微孔结构、巨大的比表面积使它具有极大的吸附量且性能优于其他吸附剂材料^[42]。水中的微生物以碳纤维为生长载体, 繁殖形成生物膜, 利用生物修复技术治理富营养化水体。国内外学者应用碳纤维材料针对富营养化水体水质改善开展了相关研究, 结果表明, 碳纤维对水中 TN 、 NH_4^+-N 、COD 和 TP 具有一定的去除效果, 处理后水质得到改善。

姚理为等^[43]以北京朝阳区清河水为原水, 研究了碳纤维对富营养化水体的水质改善情况, 结果表明, 碳纤维挂膜后对 TN 和 NH_4^+-N 具有良好的去除效果, 去除率分别达 40% 和 98%。姚辉等^[44]利用碳纤维和小型曝气机进行养猪场废水处理实验。结果表明, 组合利用碳纤维和曝气处理养猪场废水效果最佳, 显著高于单独利用碳素纤维或曝气处理, 经过 14 d 处理后, COD、 NH_4^+-N 、 TN 和 TP 的去除率分别为 83.7%、84.1%、32.0% 和 20.8%。湛莉莎^[45]以某水产养殖场废水为实验污水, 研究水力停留时间、曝气强度 2 个因素对碳纤维污水处理效果的影响。实验结果表明, 当水力停留时间为 10 h、曝气强度为 1.5 m^3/h 时, COD、 NH_4^+-N 、TP 和浊度的去除率达到最高, 分别为 80%、60%、30% 和 81% 左右。

周娟娟等^[46]通过实验证明,微生物在碳纤维上生长及生物挂膜是可行的。用生物挂膜的碳纤维处理微污染原水,实验结果显示,生物活性碳纤维可有效去除水中有机污染物, COD_{Mn} 去除率能达到 54%~65%。

李兰等^[47]为改变碳纤维表面的官能团种类和数量及表面亲水性,以 CO₂ 为氧化活化剂,在 650、750、850 和 950 °C 4 个温度点进行氧化活化,并在最佳温度下进行样品制备。将改性前后的碳纤维分别用在水体中观测其挂膜生物量,改性后的碳纤维上形成的生物量大且亲水性好。在实验区中投放改性后的碳纤维并测定水中 TN、TP、COD 及 BOD 指标,经过 4 个月的处理,水中 TN、TP、COD 和 BOD 的去除率分别达到 69.4%、84%、73.3% 和 42.9%,水质得到改善。

Zhang 等^[48]研究了由碳纤维与氧化镧组合的一种新型吸附剂对水中磷酸盐的吸附效果。通过研究发现,在最佳制备条件下:氧化镧与碳纤维的质量百分比为 11.78%、活化温度为 650 °C、活化时间为 2.5 h,此时生成的吸附剂对水中磷酸盐有良好的吸附去除效果,去除率可达 97.6%。

水体富营养化会导致一些副产物的产生,微囊藻毒素是蓝绿藻在富营养化水体中大量繁殖产生的一种有害物质,会对水生物、人体健康产生不良影响。郑西强等^[49]研究了活性碳纤维对微囊藻毒素 MC-LR 的吸附性能,结果表明,活性碳纤维对 MC-LR 的最大吸附量约达 0.25 mg/g 且活性碳纤维可再生重复使用。袁媛等^[50]用活性碳纤维对微囊藻毒素降解菌进行固定化,研究其对微囊藻毒素 MC-LR 的去除效果,结果表明,当碳纤维用量为 10 g/L、温度为 35 °C、pH 值为 8.0 时对 MC-LR 的去除效果最佳。Pyo 等^[51]通过反相高效液相色谱法研究了碳纤维对微囊藻毒素的吸附效果,实验结果表明,碳纤维对 LR 微囊藻毒素的去除率达 39.1% 以上,对 RR 微囊藻毒素的去除率达 42.3% 以上,碳纤维对微囊藻毒素有良好的吸附去除效果。

2.4 有关碳纤维的其他研究

此外,国内外学者针对碳纤维材质、处理运行条件对碳纤维去污效果影响进行了研究。实验结果表明,在碳纤维去除污染物的过程中,外界影响因素及制备碳纤维所用原材料的不同,使处理效果存在差异。

王朔等^[52]应用碳纤维和间歇曝气强化的泛氧

化塘对长春新凯河河水开展治理实验研究,考察了单一的填料强化和“间歇曝气+填料强化泛氧化塘”对污染物的去除效果。实验中发现 COD、TP 和 NH₄⁺-N 的去除效果受温度影响较为明显, NH₄⁺-N 去除率同时也受溶解氧的影响。最佳运行条件下,碳纤维曝气泛氧化塘对 COD、TP 和 NH₄⁺-N 的平均去除率分别为 34.2%、26.1% 和 53.1%。

Matsumoto 等^[53]用 4 种不同材料的纤维在相同条件下进行微生物附着培养 10 min,分别剪取 3 cm 的载体纤维段,然后浸在悬浮液中于 30 °C、200 r/min 条件下振荡,计算微生物的粘附速率常数。其中碳纤维对微生物的吸附速率最高,优于聚丙烯腈、聚乙烯和芳香族聚酰胺材料的合成纤维,吸附速率是这 3 种纤维的 1.5~10 倍。并通过检测水中微生物和纤维表面的电性,发现两者均带负电,碳纤维所带负电最弱,因此,同其他纤维相比更易附着微生物。Gong 等^[54]发现,在实现较高的污染物去除方面碳纤维表现优于玻璃纤维和聚乙烯醇纤维。Lin 等^[55]研究不同温度条件下活性碳纤维对高浓度甲苯的氧化吸附效果,结果表明,温度 25 °C、甲苯浓度 1 200 mg/L 时,碳纤维对甲苯的最佳吸附量为 569 mg/g。以上说明碳纤维是一种优良的材料,可用于废水处理。

3 结 语

综上所述,目前碳纤维在水处理方面的应用主要依靠的是高强吸附性能,碳纤维作为生物膜载体用于污水处理的过程也被证明是可行的。当前国内有关碳纤维应用于污水水质改善方面的试验研究起步较晚,且相关研究较少,可以开展以下研究:挂膜碳纤维材料对污染物的吸附效果及挂膜方式对污染物的去除效果,比较碳纤维的吸附作用及微生物脱氮作用在去除污染物过程中所占的比重;观察碳纤维材料的纤丝结构、碳纤维上附着微生物的类群及分布特征,分析碳纤维结构对微生物附着的影响、生物活性同水质净化关系及生物脱氮除磷的净化机理;此外,还可以研究碳纤维材料改性、再生性以及同其他工艺组合使用的处理效果。

参 考 文 献

- [1] 金相灿,胡小贞,储昭升,等.“绿色流域建设”的湖泊富营养化防治思路及其在洱海的应用. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1203-1209

- Jin Xiangcan, Hu Xiaozhen, Chu Zhaosheng, et al. Green watershed construction strategy for prevention of lake eutrophication and its application in Lake Erhai. *Research of Environmental Sciences*, **2011**, 24(11):1203-1209 (in Chinese)
- [2] 井塚淑夫, 小島昭. 碳纤维在工业和水质净化方面的应用. 国外化纤技术, **2013**, 42(2):43-47
Imigaku T., Akira K. The applications of carbon fiber in industry and water quality purification. *The Abroad Technology of Chemical Fiber*, **2013**, 42(2):43-47 (in Chinese)
- [3] 赵镗良, 李晓兵, 邓捷. 纳米活性炭纤维处理大型养猪场废水的应用研究. 甘肃科学学报, **2013**, 25(3):36-38
Zhao Lanliang, Li Xiaobing, Deng Jie. An applied study on the the piggery wastewater treatment by using nano-activated carbon fibers. *Journal of Gansu Sciences*, **2013**, 25(3):36-38 (in Chinese)
- [4] 钱鑫, 支建海, 王雪飞, 等. 碳纤维表面结构对复合材料吸湿性能的影响. 无机材料学报, **2013**, 28(2):189-194
Qian Xin, Zhi Jianhai, Wang Xuefei, et al. Effect of fiber surface structure on absorption properties of carbon fiber reinforced composites. *Journal of Inorganic Materials*, **2013**, 28(2):189-194 (in Chinese)
- [5] 方纪才. 21 世纪最有诱惑力的新材料: 碳纤维. 润滑油与燃料, **2005**, 15(3):20-21
- [6] 唐登勇, 郑正, 苏东辉, 等. 活性炭纤维在水处理中的应用研究新进展. 工业用水与废水, **2003**, 34(4):1-4
Tang Dengyong, Zheng Zheng, Su Donghui, et al. New progresses in applied research on activated carbon fiber in water treatment. *Industrial Water & Wastewater*, **2003**, 34(4):1-4 (in Chinese)
- [7] 钱伯章. 国内外碳纤维市场分析与研发进展. 新材料产业, **2007**(2):58-62
Qian Bozhang. The analysis and research progress of carbon fiber at home and abroad. *Advanced Materials Industry*, **2007**(2):58-62 (in Chinese)
- [8] 陈东生, 敖玉辉, 李永贵, 等. 活性炭纤维的研究与应用. 化工新材料, **2000**, 28(8):20-23
Chen Dongsheng, Ao Yuhui, Li Yonggui, et al. Research of activated carbon fiber and its current application. *New Chemical Materials*, **2000**, 28(8):20-23 (in Chinese)
- [9] Meng Linghui, Fan Dapeng, Zhang Chunhua, et al. Surface amination and hydrolyzation of carbon fibers treated with triethylene tetramine in supercritical water/ethanol system. *Composites Part B:Engineering*, **2014**, 56:575-581
- [10] Han S. H., Oh H. J., Kim S. S. Evaluation of fiber surface treatment on the interfacial behavior of carbon fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Part B:Engineering*, **2014**, 60:98-105
- [11] Li Min, Liu Hongxin, Gu Yizhou, et al. Effects of carbon fiber surface characteristics on interfacial bonding of epoxy resin composite subjected to hygrothermal treatments. *Applied Surface Science*, **2014**, 288:666-672
- [12] 金立国. 我国碳纤维工业现状和碳纤维应用. 合成纤维, **2009**(10):1-6
Jin Ligu. Present situation of China carbon fiber industry and application of carbon fiber. *Synthetic Fiber in China*, **2009**(10):1-6 (in Chinese)
- [13] Sim K. M., Kim K. H., Hwang G. B., et al. Development and evaluation of antimicrobial activated carbon fiber filters using *Sophora flavescens* nanoparticles. *Science of the Total Environment*, **2014**, 493:291-297
- [14] Sidheswaran M. A., Destailats H., Sullivan D. P., et al. Energy efficient indoor VOC air cleaning with activated carbon fiber (ACF) filters. *Building and Environment*, **2012**, 47:357-367
- [15] Liu Zhenshu, Li Wenkai, Hung M. H. Simultaneous removal of sulfur dioxide and polycyclic aromatic hydrocarbons from incineration flue gas using activated carbon fibers. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **2014**, 64(9):1038-1044
- [16] 王琳玲, 胡睿, 陆晓华. 活性炭纤维对水中五氯酚的吸附性能研究. 环境科学与技术, **2008**, 31(10):19-21
Wang Linling, Hu Rui, Lu Xiaohua. Adsorption efficiency of pentachlorophenol on activated carbon fibers. *Environmental Science & Technology*, **2008**, 31(10):19-21 (in Chinese)
- [17] 柴春玲, 孙艺飞, 张建军, 等. 活性炭纤维吸附废气中的丙烯酸和甲苯. 化工环保, **2010**, 30(5):383-386
Chai Chunling, Sun Yifei, Zhang Jianjun, et al. Adsorption of acrylic acid and toluene from waste gas on activated carbon fiber. *Environmental Protection of Chemical Industry*, **2010**, 30(5):383-386 (in Chinese)
- [18] Bismarck A., Wuertz C., Springer J. Basic surface oxides on carbon fibers. *Carbon*, **1999**, 37(7):1019-1027
- [19] 沃西源. 国内外几种碳纤维性能比较及初步分析. 高科技纤维与应用, **2000**, 25(2):30-36
Wo Xiyuan. Comparison and elemental analysis of the performance of domestic and abroad carbon fiber. *Hi-Tech Fiber & Application*, **2000**, 25(2):30-36 (in Chinese)
- [20] 曹雅秀, 刘振宇, 郑经堂. 活性炭纤维及其吸附特性. 炭素, **1999**(2):20-23
Cao Yaxiu, Liu Zhenyu, Zheng Jingtang. Activated carbon fibers and their adsorption properties. *Carbon*, **1999**(2):20-23 (in Chinese)

- [21] 吴明铂,李中树,冯永训,等. 活性炭纤维在饮用水净化中的应用展望. 炭素, **2008**(3):8-14
Wu Mingbo, Li Zhongshu, Feng Yongxun, et al. Potential application of activated carbon fiber in the purification of drinking water. Carbon, **2008**(3):8-14 (in Chinese)
- [22] 陈榕,郑翔龙,胡熙恩. 活性炭纤维在水污染防治领域的应用. 化工新型材料, **2011**, 39(11):11-12
Chen Rong, Zheng Xianglong, Hu Xi'en. Applications of active carbon fiber in water pollution and control. New Chemical Materials, **2011**, 39(11):11-12 (in Chinese)
- [23] 吴春笃,张波,李海燕. 生物接触氧化工艺用填料的生物膜特性. 江苏大学学报, **2008**, 29(1):74-77
Wu Chundu, Zhang Bo, Li Haiyan. Biofilm characteristics in biological contact oxidation packing. Journal of Jiangsu University, **2008**, 29(1):74-77 (in Chinese)
- [24] 邹联沛,陈芳,王欣泽,等. 生物绳-湿地植物复合人工湿地深度净化微污染水体的试验. 上海大学学报, **2013**, 19(5):465-469
Zou Lianpei, Chen Fang, Wang Xinze, et al. High purification of micro-polluted water in compound artificial wetland with bio-cord and wetland plant. Journal of Shanghai University, **2013**, 19(5):465-469 (in Chinese)
- [25] 姚理为. 碳素纤维在水质改善与生态修复领域的应用研究. 湘潭:湘潭大学硕士学位论文, **2012**
Yao Liwei. The application of carbon fiber in water purification and ecological restoration. Xiangtan: Master Dissertation of Xiangtan University, **2012** (in Chinese)
- [26] 项栋,罗益锋. 碳纤维在水环境治理的应用:21世纪的崭新课题. 高科技纤维与应用, **2012**, 37(4):49-56
Xu Dong, Luo Yifeng. The application of carbon fiber in harness of water environment: New task in 21th century. Hi-Tech Fiber & Application, **2012**, 37(4):49-56 (in Chinese)
- [27] 项栋,罗益锋. 用碳纤维确保和促进渔业资源的发展. 高科技纤维与应用, **2012**, 37(5):31-36
Xu Dong, Luo Yifeng. Development of fishery resources by using carbon fiber. Hi-Tech Fiber & Application, **2012**, 37(5):31-36 (in Chinese)
- [28] 蒲生孝治. カーボン西陣織による陸水域の自然再生. 現代社会研究, **2009**(12):143-154
- [29] 张鹏. 低温条件下垂直潜流碳纤维人工湿地和BAF组合工艺对生活污水处理研究. 北京:北京化工大学硕士学位论文, **2011**
Zhang Peng. Synergism of novel VSF-CFCW and baf for sewage treatment in cold climate. Beijing: Master Dissertation of Beijing University of Chemical Technology, **2011** (in Chinese)
- [30] 余帆洋,高强,余安仁,等. 广州市白云湖碳素纤维生态草硝化反硝化细菌分离鉴定. 生态科学, **2013**, 32(5):582-587
Yu Fanyang, Gao Qiang, Yu Anren, et al. Isolation and identification of nitrifying and denitrifying bacteria on carbon fiber ecological grass in Guangzhou Baiyun Lake. Ecological Science, **2013**, 32(5):582-587 (in Chinese)
- [31] 索帮成,李兰. 碳纤维生态基技术在湖泊水体修复中的应用前景//河湖水生态水环境专题论坛论文集. 武汉:湖北省水利学会,武汉水利学会, **2011**:221-226
- [32] Keiko S., Mai E., Kunihiko K., et al. Removal of manganese (II) ions from water by leptothrix discophora with carbon fiber. Materials Transactions, **2002**, 43(11):2773-2777
- [33] 曾凡龙,潘鼎. 我国活性碳纤维的研究、工业化及前景(I). 材料导报, **2003**, 17(9):61-63
Zeng Fanlong, Pan Ding. China's ACF technology efforts: Research, commercialization and development prospects (I). Materials Review, **2003**, 17(9):61-63 (in Chinese)
- [34] 桑松表. 活性炭纤维吸附饮用水中卤乙酸的研究. 上海:同济大学硕士学位论文, **2008**
Sang Songbiao. The removal of haloacetic acids in water by activated carbon fiber. Shanghai: Master Dissertation of Tongji University, **2008** (in Chinese)
- [35] 孙治荣,范延臻,王宝贞. 改性GAC及ACF去除水中有机污染物的静态研究. 哈尔滨建筑大学学报, **2000**, 33(4):46-49
Sun Zhirong, Fan Yanzhen, Wang Baozhen. Static study on the removal of organic pollutants in water by modified GAC and ACF. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, **2000**, 33(4):46-49 (in Chinese)
- [36] 李颖,岳钦艳,高宝玉,等. 活性炭纤维对活性染料的吸附动力学研究. 环境科学, **2007**, 28(11):2637-2641
Li Ying, Yue Qinyan, Gao Baoyu, et al. Adsorption kinetics of reactive dyes on activated carbon fiber. Environmental Science, **2007**, 28(11):2637-2641 (in Chinese)
- [37] 魏永前. 碳纤维膜生物反应器在处理难降解有机废水中的应用研究. 苏州:苏州大学硕士学位论文, **2004**
Wei Yongqian. Application of carbon fiber membrane bioreactor for treatment difficult degradation organic wastewater. Suzhou: Master Dissertation of Suzhou University, **2004** (in Chinese)
- [38] 张培,张小平,兰永辉,等. 活性炭纤维吸附处理模拟焦化废水尾水. 化工进展, **2012**, 31(12):2786-2790
Zhang Pei, Zhang Xiaoping, Lan Yonghui, et al. Adsorption and treatment of simulated coking waste water by activated carbon fiber. Chemical Industry and Engineering Progress,

- 2012,31(12):2786-2790(in Chinese)
- [39] Zaini M. A. A., Amano Y., Machida M. Adsorption of heavy metals onto activated carbons derived from polyacrylonitrile fiber. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 180(1-3):552-560
- [40] Tang Dengyong, Zheng Zheng, Lin Kui, et al. Adsorption of *p*-nitrophenol from aqueous solutions onto activated carbon fiber. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1-2):49-56
- [41] Wang Lie, Yao Yuyuan, Zhang Zhanhao, et al. Activated carbon fibers as an excellent partner of Fenton catalyst for dyes decolorization by combination of adsorption and oxidation. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 251:348-354
- [42] 王风芹, 杨乐, 侯淑芬, 等. 活性炭纤维生态草对水体氨氮脱除的影响. *江西农业学报*, 2013, 25(6):116-118
Wang Fengqin, Yang Le, Hou Shufen, et al. Effect of activated carbon fiber ecological grass on removal of ammoniac nitrogen in water body. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2013, 25(6):116-118(in Chinese)
- [43] 姚理为, 余辉, 田学达, 等. 碳纤维对富营养化水体的水质改善与对藻类群落结构的影响. *环境科学研究*, 2012, 25(8):890-896
Yao Liwei, Yu Hui, Tian Xueda, et al. Impacts of carbon fiber on eutrophic water quality improvement and its algal community structure. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(8):890-896(in Chinese)
- [44] 姚辉, 郭荣军, 金树权, 等. 碳素纤维加曝气处理养猪场废水试验. *浙江农业科学*, 2013(5):608-610
Yao Hui, Guo Rongjun, Jin Shuquan, et al. The piggyery wastewater treatment by carbon fiber with aeration. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2013(5):608-610(in Chinese)
- [45] 湛莉莎. 活性炭纤维吸附性能及其在水产养殖水体的处理研究. 北京:北京化工大学硕士学位论文, 2012
Zhan Lisha. Study on activated carbon fiber adsorption and applyment on treatment of aquaculture water. Beijing: Master Dissertation of Beijing University of Chemical Technology, 2012(in Chinese)
- [46] 周娟娟, 胡中华, 刘亚菲, 等. 生物活性炭纤维的制备及其水处理. *新型炭材料*, 2006, 21(1):64-69
Zhou Juanjuan, Hu Zhonghua, Liu Yafei, et al. Preparation and water treatment of biological activated carbon fiber. *New Carbon Materials*, 2006, 21(1):64-69(in Chinese)
- [47] 李兰, 索帮成, 常布辉, 等. 碳素纤维改性及其在富营养化水体中的挂膜实验. *中国农村水利水电*, 2013(3):53-57
Li Lan, Suo Bangcheng, Chang Buhui, et al. The modified of carbon fiber and its hanging membrane in the eutrophication of water bodies. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(3):53-57(in Chinese)
- [48] Zhang Ling, Wan Lihua, Chang Ning, et al. Removal of phosphate from water by activated carbon fiber loaded with lanthanum oxide. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1-3):848-855
- [49] 郑西强, 刘群, 陈云峰. 活性炭纤维对水中微囊藻毒素的吸附性能. *环境工程学报*, 2013, 7(10):3802-3806
Zheng Xiqiang, Liu Qun, Chen Yunfeng. Adsorption performance of activated carbon fiber to microcystins in water. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(10):3802-3806(in Chinese)
- [50] 袁媛, 吴涓, 李玉成, 等. 活性炭纤维固定化菌对微囊藻毒素 MC-LR 的去除研究. *中国环境科学*, 2014, 34(2):403-409
Yuan Yuan, Wu Juan, Li Yucheng, et al. Removal of microcystin-LR by a microcystin-degrading strain immobilized by activated carbon fiber. *China Environmental Science*, 2014, 34(2):403-409(in Chinese)
- [51] Pyo D., Moon D. Adsorption of microcystin LR by activated carbon fibers. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2005, 26(12):2089-2092
- [52] 王朔, 海热提, 周东凯, 等. 碳素纤维泛氧化塘治理高寒地河水的试验研究. *环境科学与技术*, 2012, 35(12):13-18
Wang Shuo, Hai Reti, Zhou Dongkai, et al. Treatment of alpine region river by carbon fiber pan-oxidation pond. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(12):13-18(in Chinese)
- [53] Matsumoto S., Ohtaki A., Hori K. Carbon fiber as an excellent support material for wastewater treatment biofilms. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(18):10175-10181
- [54] Gong Weijia, Liang Heng, Li Wenzhe, et al. Selection and evaluation of biofilm carrier in anaerobic digestion treatment of cattle manure. *Energy*, 2011, 36(5):3572-3578
- [55] Lin C. L., Cheng Y. H., Liu Zhenshu, et al. Adsorption and oxidation of high concentration toluene with activated carbon fibers. *Journal of Porous Materials*, 2013, 20(4):883-889