

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	
专辑征稿通知(4172)	

基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理

庆承松, 鲍韬, 陈天虎*, 陈冬, 谢晶晶

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 以粒径0.15~0.18 mm的天然沸石粉为主要原料, 水泥为黏结剂, 制备出粒径4~8 mm的沸石复合滤料(ZCF)。对制备的材料进行了空隙率、表观密度、强度等性能测试。优化出复合滤料中 $m(\text{沸石粉}):m(\text{水泥})=7:3$, 自然条件下养护15 d。利用该ZCF装填实验柱, 完成硝化微生物挂膜培养, 然后进行间歇式脱氮水处理动态实验, 间歇式运行周期分为吸附、生物再生、淋洗共3个阶段。采用上流式进水吸附脱氮, 以 NH_4^+-N 浓度低于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为出水标准, 出水超标后, 排空实验柱中水, 鼓风生物再生, 用水淋洗滤料后重复沸石吸附-生物再生循环, 淋洗液单独进行反硝化处理。结果表明, 在模拟实验条件下间歇式运行最佳的周期为: 吸附5 d, 鼓风生物再生24 h, NH_4^+-N 平均去除率为87.7%, TN平均去除率达51.2%。

关键词: 沸石; 滤料; 间歇式; 脱氮; 再生

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4380-07

Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation

QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, XIE Jing-jing

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The zeolite composite filters (ZCF) with the size of 4-8 mm were prepared using raw zeolite (0.15-0.18 mm) as the main material and the cement as binder. After a combination of material characterizations, such as the void fraction, apparent density, compression strength and surface area, the optimal prepared conditions of composite filters were obtained as follow: weight ratio of $m(\text{zeolite}):m(\text{cement})=7:3$, curing for 15 d under the moisture condition and ambient temperature. Through upflow low-concentration ammonia nitrogen wastewater, ZCF filled in the experimental column was hung with the biological membrane. Thus, intermittent dynamic experiments were conducted, the intermittent operation cycle included adsorption, biological regeneration and drip washing. Until concentration of ammonia nitrogen was more than $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of effluent standards, water in experiment column was firstly emptied, and then blast biological regeneration was conducted. After the filters were bathed with water, the zeolite adsorption-biological regeneration cycle was performed repeatedly. The experimental results show that under conditions of 24 h blast and 5 d of continuous operation period, ammonia nitrogen removal rate is up to 87.6% on average, total nitrogen removal rate reaches 51.2% on average.

Key words: zeolite; composite filter; intermittent; denitrification; regeneration

NH_4^+-N 是水环境中氮的主要形态之一, 是引起水体富营养化的重要污染物。传统的处理水中 NH_4^+-N 的方法包括吹脱法、化学沉淀法, 不适用于低浓度 NH_4^+-N 的去除^[1]。目前, 研究较多的是曝气生物滤池, 并且已经获得了较广泛的应用, 但还存在一些有待改进的技术问题^[2]: ①通常的曝气生物滤池填料是高温烧结的陶粒, 由于烧制时表面熔融釉化, 虽然是多孔材料, 但没有开放空隙, 微生物不能够进入到颗粒内部, 仅在表面形成生物膜, 生物负载量受到限制; ②陶粒滤料基本不具有吸附功能; ③负载微生物把水中的 NH_4^+-N 转化为硝酸盐氮, TN去除率不高; ④需要进行曝气, 由于滤池存在较大的静水压力, 曝气能耗仍然较大。为了解决陶粒滤料存在的这些问题, 很多学者研究沸石脱氮技术。

沸石对 NH_4^+ 具有优异的选择性交换能力, 是廉价的处理 NH_4^+-N 废水离子交换材料^[3], 李德生

等^[4]、田文华等^[5]和戴兴春等^[6]研究沸石脱氮技术, 沸石对低浓度 NH_4^+-N 有较好的处理效果。但用沸石处理水中的 NH_4^+-N , 沸石再生存在很大的问题。常用的沸石再生方法为氯化钠溶液交换法, 氯化钠再生液中 NH_4^+ 的回收处理过程复杂、成本高, 从而给氯化钠循环使用带来困难^[7]。

将沸石吸附与生物膜法结合起来, 即用颗粒沸石替代曝气生物滤池中的陶粒滤料, 利用沸石对 NH_4^+ 的选择性吸附去除 NH_4^+-N , 微生物硝化实现沸石的再生。Tsuno等^[8]于1994年提出了生物沸石的概念, 并采用生物沸石反应器处理含 NH_4^+-N 废水, 证明了沸石吸附和生物再生是可以在一个反应器内

收稿日期: 2012-02-03; 修订日期: 2012-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102023, 41072036, 41072035)

作者简介: 庆承松(1961~), 男, 教授, 主要研究方向为环境矿物材料, E-mail: csqing@hfut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chentianhu168@vip.sina.com

动态同时进行的; Green 等^[9]和 Lahav 等^[10~12]利用设计的“沸石离子交换-生物再生”反应器处理二级排水,进一步研究了生物膜对沸石吸附的影响;陈和谦等^[13]研究了沸石联合生物吸附再生工艺处理城市污水,出水优于传统的二级处理工艺,沸石的生物再生率达 80%。

颗粒沸石是矿石直接破碎而成的若干毫米大小的粗颗粒, NH_4^+ -N 吸附和再生传质速率慢,颗粒沸石密度大,这又给系统反冲洗造成一定的困难,同时,颗粒沸石也存在空隙率低、微生物不能进入颗粒沸石的内部仅附着在表面的问题,而且,反冲洗时表面生物膜脱落,硝化效率剧减。颗粒沸石代替陶粒滤料并没有完全解决曝气生物滤池存在的问题。

本研究采用天然沸石细粉为主要原料,水泥为粘结剂,制备成高空隙率的曝气生物滤池滤料,并且采用吸附、生物再生、淋洗这 3 个阶段的间歇式运行方式,以期改进现行曝气生物滤池处理水中 NH_4^+ -N 所存在的问题。

1 材料与方法

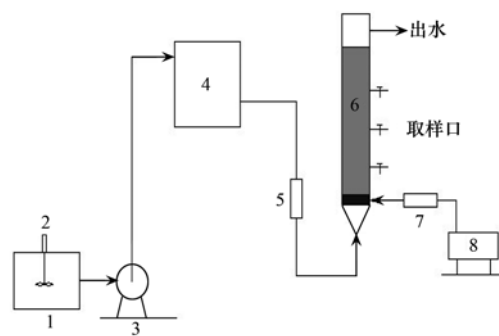
1.1 实验材料的制备

沸石样品取自安徽宣城水东镇沸石矿,将沸石矿石破碎过筛,取 0.15~0.18 mm 粒级得到沸石粉。采用安徽巢湖屹东水泥制造公司的 325 号矿渣硅酸盐水泥作为黏结剂。将沸石粉与水泥按照不同的质量比混合均匀,混合料加入成球滚筒中,边喷水边滚动成球,筛分取粒径 4~8 mm 的颗粒,保湿环境温度下养护 15 d,即得到沸石复合滤料(ZCF)。按照中华人民共和国城镇建设行业标准(CJ/T 299-2008)“水处理用人工陶粒滤料”测定所制备滤料的性能指标:空隙率、堆积密度、表观密度、颗粒抗压强度。

1.2 水处理实验

实验装置如图 1 所示,滤柱直径为 6 cm,总高度 180 cm,把自制 ZCF 装填进实验柱,滤料层高度 140 cm。实验含 NH_4^+ -N 废水用自来水加入 NH_4Cl 配制而成, NH_4^+ -N 浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,并加入可溶性淀粉($2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和微量的硫酸亚铁、硫酸镁、氯化钙、碳酸氢钠、磷酸二氢钾作为营养物。

动态实验柱首先用活性污泥接种挂膜。从合肥某污水处理厂回流井取活性污泥 10 L,高速搅拌 10 min,静沉 20 min 弃去沉淀残渣,把悬浮液导入实验柱并注满水,加入一定量 NH_4^+ -N 及其它营养物,曝气 24 h 后用自来水更换实验柱中的水,重新投加营养物再曝气 3 d,然后改成小流量进水,待出水清澈



1. 配水箱; 2. 搅拌器; 3. 蠕动泵; 4. 高位水箱; 5. 流量计;
6. 沸石滤料生物滤池; 7. 流量计; 8. 空压机

图 1 曝气生物滤池实验装置示意

Fig. 1 Experimental schematic diagram of biological aerated filter (BAF) system

后,逐渐减少停留时间,挂膜培养。当 NH_4^+ -N 去除率稳定时认为实验柱填料形成稳定的生物膜,启动挂膜结束,进入间歇运行实验阶段。

吸附阶段:用上流式进水,且在进水过程中不进行曝气,进水水力负荷 $0.5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$,水力停留时间 2 h,每间隔 4 h 取水样检测 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N,待 NH_4^+ -N 出水浓度超过 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时停止进水。ZCF 对 NH_4^+ -N 的吸附量^[14~18]根据公式(1)计算。

$$\Gamma = (c_0 - c_e - c_{\text{NO}_3^- - \text{N}} - c_{\text{NO}_2^- - \text{N}}) \cdot V/m \quad (1)$$

式中, Γ 为 NH_4^+ -N 的吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), c_0 为起始 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_e 为出水 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $c_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为出水中 NO_3^- -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $c_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 为出水中 NO_2^- -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V 表示出水浓度穿透 ($>2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时累计流量 (L), m 代表沸石质量 (g)。

再生阶段:排空实验柱中的水,鼓风(鼓风量 $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$),生物再生一定时间后停止。淋洗阶段:用 10 L 自来水对实验柱滤料进行淋洗,收集淋洗液并测定其中含有的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度。生物再生量,根据公式(2)计算。

$$\eta = (c_{\text{NH}_4^+ - \text{N}} + c_{\text{NO}_3^- - \text{N}} + c_{\text{NO}_2^- - \text{N}}) \cdot V/m \quad (2)$$

式中, η 为 NH_4^+ -N 的吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), $c_{\text{NH}_4^+ - \text{N}}$ 为淋洗液中 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $c_{\text{NO}_3^- - \text{N}}$ 为淋洗液中 NO_3^- -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $c_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 为淋洗液中 NO_2^- -N 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V 表示淋洗液体积为 10 L, m 代表沸石质量 (g)。

NH_4^+ -N 采用纳氏试剂分光光度法(上海精仪 722E 型分光光度计)测定, NO_3^- -N 采用 254 nm 波长紫外光分光光度法(上海精科 752N 紫外分光光

度计)测定, NO_2^- -N采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法(722E 型分光光度计)测定;溶解氧用 JPB-607 型溶氧仪测定. 以上实验指标采用文献[19]所述方法监测.

取挂膜成功后的滤料,用日本 JSM-6490LV 型场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察滤料的微结构. 选取制备好的 ZCF 进行比表面积的测定,用美国康塔 NOVA 3000e 比表面积和孔径分析仪测定 BET 比表面积.

同时对自制 ZCF 进行 NH_4^+ -N 静态去除效果实验,分别取经蒸馏水清洗、自然晾干的不同配比滤料 5 g,放入 250 mL 锥形瓶中,加入 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NH_4Cl 溶液 200 mL,密封后在振荡器上振荡 2 h,静置 0.5 h,取上清液,测定水中的 NH_4^+ -N 浓度,计算滤料对 NH_4^+ -N 的去除率.

2 结果与讨论

2.1 制备工艺优化

为确定 ZCF 的最佳组成,设计 5 组不同的天然沸石粉与水泥质量配比,组号 1~5 分别为:85:15、80:20、75:25、70:30、65:35,利用 1.1 节所述方法制备出上述 5 组不同配比的滤料,对其分别进行颗粒强度测试和 NH_4^+ -N 处理效果的性能实验,以颗粒强度和 NH_4^+ -N 处理效率为考察指标,优化筛选制备 ZCF 的配比.

实验测得的颗粒强度和 NH_4^+ -N 处理效果如图 2 所示. 4 号样品的颗粒强度为 74.6 N,满足生物滤池对滤料强度的要求,而且对 NH_4^+ -N 的处理效果优于 5 号,由此最后确定制备 ZCF 的配方为 7:3. 按此原料配比制备出 ZCF 实物如图 3 所示,主要性能指标见表 1.

在实验运行温度(15°C)下,分别取 3 g 粒径同为 5 mm 的 ZCF 滤料和天然沸石,分别加入 500 mL 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 NH_4^+ -N 模拟废水,设置恒温振荡箱温度为 15°C ,放入恒温振荡箱中以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速振荡一定时间后,离心分离数分钟,每隔一定的时间测定溶液中 NH_4^+ -N 浓度. 测得 ZCF 滤料对 NH_4^+ -N 的饱和吸附量为 $1.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,天然沸石饱和吸附量为 $2.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; ZCF 滤料的饱和吸附量比纯天然沸石颗粒的吸附量小,主要是由于滤料中含有 30% 的水泥,但是 ZCF 滤料的表面粗糙度大,有利于微生物在外表面附着生长,且内部孔隙率高,内外孔隙间贯通性强,使微生物便于进入滤料内部生长,而纯颗粒沸石密度较大,且内外孔隙间贯通性

较差,微生物的附载量小,不利于微生物对内部吸附 NH_4^+ -N 的生物再生. 实验用的安徽宣城水东镇沸石矿,在粒径为 0.5~1 mm 时对 NH_4^+ -N 饱和吸附量为 $22.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [20],显然粒径的减小对 NH_4^+ -N 的吸附效果显著提高. 但是沸石粉粒径太细小,导致制备的滤料空隙率和孔径变小,不利于增大微生物在滤料内部附着. 测定 ZCF 比表面积为 $13.9 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

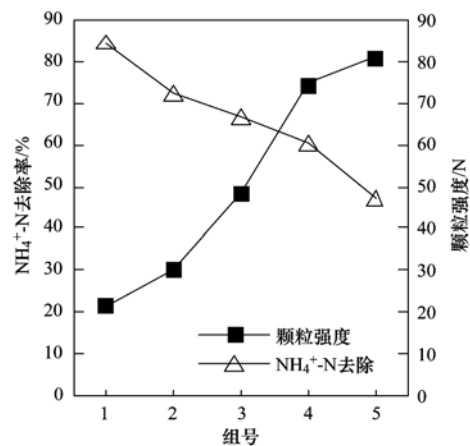


图2 沸石复合滤料性能实验

Fig. 2 Particle strength and NH_4^+ -N removal test of zeolite composite filters



图3 沸石复合滤料实物

Fig. 3 Image of zeolite composite filter

2.2 挂膜

图 4 为挂膜期间 NH_4^+ -N 去除率和进出水 NH_4^+ -N 变化情况. 进水 NH_4^+ -N 平均质量浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 NH_4^+ -N 逐渐增大,在第 9 d 出水超过实验设定的 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到 $2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此后出水 NH_4^+ -N 浓度逐渐增大, NH_4^+ -N 的去除率也由开始的 93% 下降到 73%,然后 NH_4^+ -N 去除率日渐稳定.

表 1 沸石滤料与国家标准的主要物理性能对比

Table 1 Main properties of zeolite filler comparison according to the national standard

项目	样品滤料	国家标准
粒径/mm	4~8	0.5~9.0
表观密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.68	—
堆积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.844	0.610~0.700
空隙率/%	49.8	≥ 40
强度/N	74.6	—

在开始挂膜初期,进水水温为 15°C 左右, pH 为 $7.5\sim 7.8$,溶解氧为 $6\sim 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 挂膜初期沸石表面逐渐生长的生物膜对 NH_4^+-N 也有一定的去除作用,但是在沸石没有达到吸附饱和之前,对 NH_4^+-N 的主要去除作用还是由沸石的离子交换吸附来完成的. 一般曝气生物滤池硝化反应所需溶解氧控制为 $2\sim 3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[21],因此进水中溶解氧为硝化过程中氨氮被氧化成硝氮提供了部分氧. 随着启动挂膜的进行,滤料表面硝化菌逐渐生长,硝化作用逐渐增强. 由于所配水质为模拟生活污水二级处理出水,只补充少量的有机物,有机负荷较低,硝化菌是自养性细菌,生长世代期较异养菌长,因此进水的有机物低,有利于硝化菌的生长^[22],当硝化菌的生物量稳定之后,出水 NH_4^+-N 也就达到稳定. 图 6 所示实验后期出水 NO_3^--N 浓度变化趋势与进水中 NH_4^+-N 浓度变化基本相同,反映沸石表面生物膜已成熟,硝化反应达到稳定,挂膜基本完成.

对挂膜后的生物沸石滤料进行电镜下观察,能发现微生物附着在沸石滤料内外表面上,如图 5 所示. 图 5(a) 为滤料外表面电镜图片,图 5(b) 为滤料断面电镜图片. 从图 5 中可以看到,沸石颗粒内外表面非常粗糙,布满了很多凹陷的小孔穴. 这些孔穴不仅增加了滤料的比表面积^[23],并且非常适合细菌附着,可提高附着的微生物量.

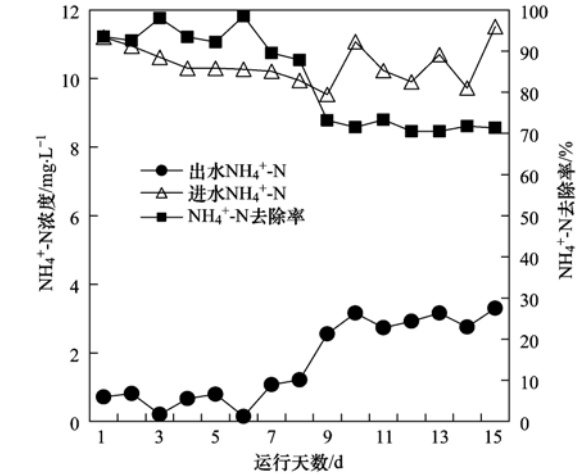
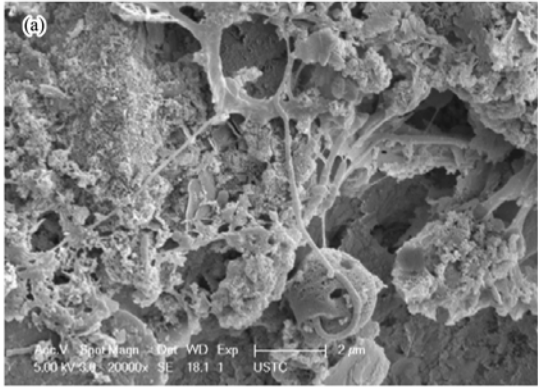


图 4 启动挂膜过程中对 NH_4^+-N 的去除

Fig. 4 NH_4^+-N concentration and removal in the zeolite composite filters effluents at the start-up phase

2.3 生物沸石滤料吸附

图 6 为挂膜期间 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、 TN 的变化情况,计算得沸石对氨氮的吸附量为 $0.93\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 由静态实验 2.1 节计算吸附量得 $1.18\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,此实验装置中沸石滤料并没有达到最终饱和状态,其主要原因是根据实验设计氨氮出水浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,即停止进水. 另从图 7 中可以看出,吸附期间 NO_3^--N 的变化不稳定,这可能是由于挂膜吸附期间硝化菌的生长不稳定造成的. 其中在第 7 d NO_3^--N 的出水浓度达到 $9.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,显然进出水的氮素不守恒,这是由于第 7 d 配水完全运行完后没有及时配水,隔夜配水运行,在隔夜未进水过程中硝化菌利用吸附在沸石滤料中的氨氮发生硝化反应所致,导致出水中的 NO_3^--N 的含量增大. 另从图 6 中可见, NH_4^+-N 和 TN 的出水浓度随着运行的天数逐渐上升,且 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的变化趋于稳定. 主要是因为运行开始阶段,生物沸石滤料主

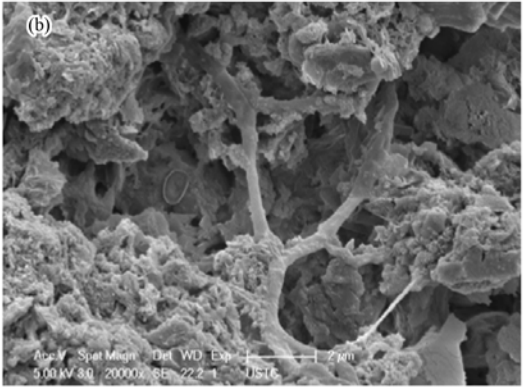


图 5 ZCF 挂膜后扫描电镜图

Fig. 5 SEM image of zeolite composite filter before and after biofilm

要以沸石的吸附为主,故出水 T N 浓度较低;随着连续运行和生物膜的生长,硝化反应逐渐加强,且沸石滤料逐渐趋于吸附饱和,从而使出水 T N 浓度逐渐上升.

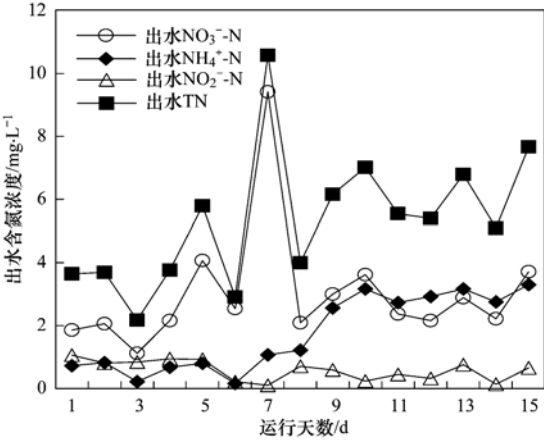


图 6 启动挂膜过程中出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的变化

Fig. 6 Removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ by zeolite composite fillings in the start-up phase

2.4 生物再生

生物沸石的再生过程是微生物对沸石表面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化和沸石内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 解吸的共同过程^[24],沸石表面吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被微生物硝化转化后,用水淋洗的液相中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度低于沸石吸附在固相 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度,沸石吸附的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被水中其他阳离子交换下来,被硝化细菌利用转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$. 图 7 为生物再生比较和解吸再生,再生量和再生时间拟合直线所得的斜率即为生物再生速率 [$0.0035 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$] 和沸石解吸再生速率 [$0.0006 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]

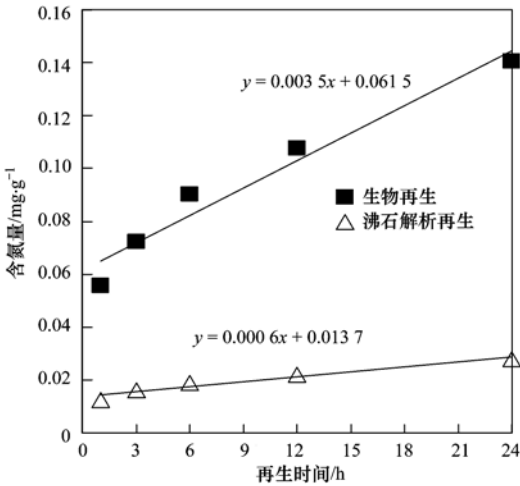


图 7 解吸再生与生物再生比较

Fig. 7 Comparison between desorption regeneration and bioregeneration

$\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$],生物再生速率明显大于沸石解吸速率. 再生初期,沸石内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量比较高,解吸速度很快,随着再生的进行,沸石内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降,解吸速度减慢,硝化反应作用表现逐渐明显,解吸出的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可以被迅速硝化去除.

图 8 为再生后 ZCF 的吸附脱氮效果,图 8(a)中

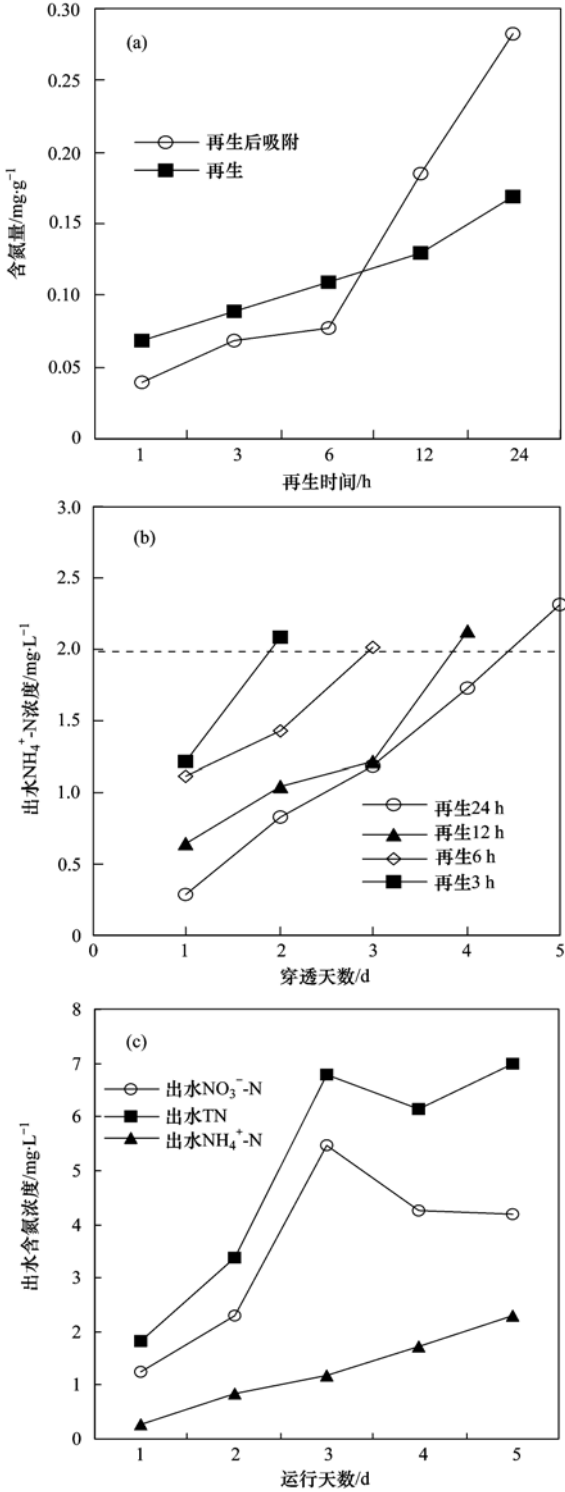


图 8 ZCF 再生效果

Fig. 8 Effect of regeneration for zeolite composite filter

再生量为解吸再生量和生物再生量之和,可以看出鼓风再生时间 <6 h,再生后吸附量小于再生量;再生时间 >6 h,再生后吸附量大于再生量. 对滤料鼓风再生后运行,出水 NH_4^+-N 浓度超过 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 所需天数,即为穿透天数,图 8(b) 为不同再生时间后进水穿透天数,其中再生 3 h,生物沸石滤料吸附运行至第 2 d,出水 NH_4^+-N 浓度超过 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;再生 24 h,进水运行至第 5 d 穿透. 由图 8(c) 所示,鼓风再生后实验进水运行,第 1 d 和第 2 d 出水的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较低, TN 去除明显. 第 3 d 后出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度明显上升, TN 去除较低. 主要因为在鼓风再生后,实验运行进水前期是由沸石的离子交换吸附为主,随着不断进水,微生物的硝化反应逐渐加强,因此导致出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度变大, TN 去除低. 因此通过对生物滤料鼓风再生,并循环间歇式运行,可解决生物沸石滤料吸附饱和和再生问题,使得出水保持在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,能够满足城市杂用水回用水质标准的要求.

2.5 与陶粒和颗粒沸石的对比

图 9 为颗粒沸石、陶粒、ZCF 内部孔隙结构示意图, ZCF 是采用天然沸石粉和水泥复合而成,外表面粗糙度大,有利于微生物在外表面附着生长,且内部孔隙率高,内外孔隙间贯通性强,使微生物便于进

入滤料内部生长,从而提高挂膜生物量,有利于提高氨氮去除效率以及生物再生. 陶粒内部虽分布一定的大孔隙,但由于熔融釉层的存在,孔隙为封闭孔;而颗粒沸石内部孔隙率低.

将 ZCF、陶粒、颗粒沸石在相同条件下分别进行微生物挂膜培养,待挂膜稳定后分别取一定质量的填料,经去离子水 3 次洗涤、烘干,按照文献[25]方法的测定负载生物量. 测得 ZCF 的负载生物量为 $4.48 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 陶粒负载生物量为 $2.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 颗粒沸石负载生物量 $2.34 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 由此可以看出本研究制备的 ZCF 在微生物负载量方面显著优于陶粒、颗粒沸石.

本研究用 ZCF 作为填料间歇式处理含氨氮水具有如下优点:①采用 $0.15 \sim 0.18 \text{ mm}$ 的天然沸石粉制备 ZCF,与颗粒沸石相比提高了传质速率,提高了填料层对氨氮的吸附能力;②吸附阶段以离子交换为主,硝化作用为辅, TN 去除率高;③再生阶段由于滤池不存在静水压力,与曝气生物滤池相比能耗会大幅度降低;④ZCF 滤料表面粗糙、孔隙率高、空隙贯通性强,从而有利于微生物进入滤料内部附着生长,提高生物量,提高了生物再生效率;⑤淋洗富硝酸盐水易于单独进行反硝化脱氮处理.

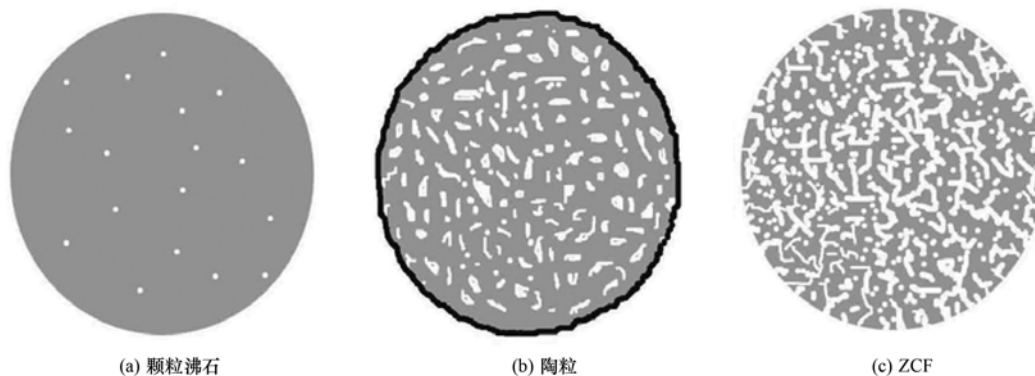


图 9 颗粒沸石、陶粒和 ZCF 内部孔隙结构对比示意

Fig. 9 Comparison of internal pore structure with zeolite, ceramite and ZCF

2.6 与连续流进水运行方式的比较

本实验采用序批式运行方式,而沸石增强生物脱氮连续流运行时,需进行曝气,在连续运行过程中由于滤池存在较大的静水压力,曝气能耗较大;而本实验在进水脱氮过程中,不对滤料进行曝气,利用 ZCF 和挂膜成功后的微生物共同脱氮,不仅有利于 NH_4^+-N 的去除,也能较好地去除 TN,从而达到真正意义上脱氮;而在鼓风生物再生阶段,将实验装置内的水排空,减少了静水压力,鼓风能耗降低且能较好地利用附着微生物使吸附饱和的 ZCF 滤料再生,

用水淋洗滤料后可重复沸石吸附-生物再生循环过程. 而序批式运行在启动运行后无须再引进接种污泥,可直接处理操作方便、易于管理且有较强的抗冲击负荷能力.

3 结论

(1)以粒径 $0.15 \sim 0.18 \text{ mm}$ 的天然沸石粉为主要原料,水泥为黏结剂,制备沸石 ZCF. 优化出沸石粉与水泥的质量比为 7:3,自然条件下养护 15 d,制备的成品填料粒径为 $4 \sim 8 \text{ mm}$,空隙率为 49.8%,

表观密度为 $1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 强度为 74.6 N , 堆积密度为 $0.844 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 比表面积 $13.9 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 制备的滤料表面粗糙多孔, 内部和外部具有相互连通且分布均匀的孔隙结构, 适合微生物的附着和生长.

(2) 利用制备的 ZCF 装填于实验柱中挂膜启动运行, 动态处理低浓度的氨氮废水, 以氨氮浓度低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为出水标准, 待氨氮出水浓度超标, 通过间隙式鼓风生物再生方法, 鼓风生物再生 24 h , 可吸附运行 5 d , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率达 87.6% , TN 平均去除率达 51.2% .

(3) 本实验研究采用序批式方式运行, 在进水过程中, 不曝气从而减少能耗; 在再生阶段, 排空实验柱中水, 只对饱和的 ZCF 滤料鼓风, 用水淋洗滤料后可重复循环脱氮过程, 从而实现 ZCF 滤料的生物再生.

参考文献:

- [1] 陈月芳, 张万有, 宋存义, 等. 城市污水深度处理回用过程中氨氮脱除问题的分析研究[J]. 工业水处理, 2005, **25**(9): 13-15.
- [2] 吴然然, 戴长虹, 陈人宝, 等. 曝气生物滤池中填料的研究进展[J]. 西南给排水, 2009, **31**(4): 20-22.
- [3] 王雅萍, 刘云, 董元华, 等. 斜发沸石对氨氮废水吸附性能的实验研究[J]. 非金属矿, 2007, **30**(6): 60-62.
- [4] 李德生, 黄晓东, 王占生. 生物沸石反应器在微污染水源水处理中的应用[J]. 环境科学, 2000, **21**(5): 71-73.
- [5] 田文华, 文湘华, 杨爱华, 等. 沸石生物滤池处理低浓度生活污水的工艺性能及影响因素[J]. 环境科学, 2003, **24**(5): 97-101.
- [6] 戴兴春, 黄民生, 徐亚同, 等. 沸石强化生化装置脱氮功能的效果及机理初探[J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1882-1888.
- [7] 刘玉亮, 罗固源, 阙添进, 等. 斜发沸石对氨氮吸附性能的试验分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, **27**(1): 62-65.
- [8] Tsuno H, Nishimura F, Somiya I. Removal of ammonium nitrogen in bio-zeolite reactor[J]. Doboku Gakkai Bombun Hokokushu, 1994, **503**: 159-166.
- [9] Green M, Mels A, Lahav O, et al. Biological-ion exchange process for ammonium removal from secondary effluent[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(1-2): 449-458.
- [10] Lahav O, Green M. Ammonium removal using ion exchange and biological regeneration[J]. Water Research, 1998, **32**(7): 2019-2028.
- [11] Lahav O, Green M. Ammonium removal from primary and secondary effluents using a bioregenerated ion-exchange process[J]. Water Science and Technology, 2000, **42**(1-2): 179-185.
- [12] Lahav O, Green M. Bioregenerated ion-exchange process: the effect of the biofilm on the ion-exchange capacity and kinetics[J]. Water SA, 2000, **26**(1): 51-58.
- [13] 陈和谦, 吴志超, 黄友谊. 沸石联合生物吸附再生工艺可行性研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, **6**(8): 26-29.
- [14] 张曦, 吴为中, 温东辉, 等. 氨氮在天然沸石上的吸附及解吸[J]. 环境化学, 2003, **22**(2): 166-171.
- [15] 黄友谊, 吴志超, 陈和谦, 等. 沸石生物联合吸附再生工艺及铵沸石再生[J]. 环境化学, 2006, **25**(5): 615-618.
- [16] 温东辉, 唐孝炎, 马倩如. 天然沸石铵吸附容量研究[J]. 环境科学研究, 2003, **16**(2): 31-34.
- [17] 温东辉, 张曦, 吴为中, 等. 天然沸石对铵吸附能力的生物再生试验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(4): 494-500.
- [18] 温东辉, 唐孝炎. 天然斜发沸石对溶液中 NH_4^+ 的物化作用机理[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(5): 509-514.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版) 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 279-281.
- [20] 钱福国, 陈天虎, 瞿丽. 安徽宣城天然斜发沸石深度处理氨氮废水研究[J]. 非金属矿, 2008, **31**(2): 62-65.
- [21] 郑俊, 吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 103.
- [22] Michaud L, Blancheton J P, Bruni V, et al. Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters[J]. Aquacultural Engineering, 2006, **34**(3): 224-233.
- [23] 姜霞, 周小宁, 丁明玉, 等. 天然沸石及改性沸石去除低浓度氨氮的研究[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 38-42.
- [24] 李冰, 崔康平, 彭叔传, 等. 天然沸石曝气生物滤柱脱氮性能及生物再生[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, **27**(1): 67-71.
- [25] Yu Y Z, Feng Y, Qiu L P, et al. Effect of grain slag media for the treatment of wastewater in a biological aerated filter[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(11): 4120-4123.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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