

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

4种人工湿地填料的f2噬菌体吸附特性

陈迪^{1,3}, 郑祥^{2,3*}, 魏源送^{1*}, 杨勇^{3,4}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 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; 3. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 4. 中国环境科学学会, 北京 100082)

摘要:以无烟煤、钢渣、沸石和镁橄榄石这4种人工湿地填料为研究对象,以f2噬菌体为模型病毒,通过静态和动态吸附试验,考察和比较了4种填料的f2噬菌体吸附效果与特性。静态吸附结果表明,4种填料的f2噬菌体吸附去除效果依次为无烟煤>钢渣>镁橄榄石≈沸石,其中无烟煤对f2噬菌体的吸附过程经历了快、中、慢3个吸附阶段,且随着无烟煤投加量的增加,f2噬菌体去除率逐渐增加,优化的无烟煤投加量为8.0 g(固液比1:12.5);4种填料的f2噬菌体等温吸附满足 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附方程;无烟煤和钢渣的f2噬菌体吸附满足准二级吸附动力学,它们的理论平衡吸附量分别为 3.35×10^8 PFU·g⁻¹和 2.56×10^8 PFU·g⁻¹,与试验条件下得到的平衡吸附量基本一致;液膜扩散过程为无烟煤和钢渣吸附f2噬菌体的速率控制步骤,但不是唯一控制步骤。动态吸附结果表明,吸附柱的f2噬菌体吸附过程经历了适应、吸附、脉冲吸附和动态平衡这4个阶段,达到动态平衡时的f2噬菌体对数去除率大于2.55 lg。

关键词:人工湿地; 填料; f2噬菌体; 病毒; 吸附

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3904-08

Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland

CHEN Di^{1,3}, ZHENG Xiang^{2,3}, WEI Yuan-song¹, YANG Yong^{3,4}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 4. Chinese Society for Environmental Sciences, Beijing 100082, China)

Abstract: Performance of f2 phages adsorption by four substrates including anthracite coal, steel slag, zeolite and forsterite was investigated through batch and dynamic experiments. Results of batch experiments showed that the removal efficiency of f2 phages by these four substrates was in the order of anthracite > steel slag > forsterite ≈ zeolite. The adsorption of f2 phages by anthracite experienced fast, medium and slow stages, and the removal efficiency of f2 phages increased gradually with the increase of anthracite dosage, e. g. the optimized dosage of anthracite was 8.0 g at a solid/liquid ratio of 1:12.5 (*m/V*). The isothermal adsorption of all four substrates was described with Freundlich and Langmuir isothermal adsorption equation very well, and the adsorption of f2 phages by both anthracite and steel slag fitted pseudo-second order adsorption kinetics at their theoretical adsorption capacities of 3.35×10^8 PFU·g⁻¹ and 2.56×10^8 PFU·g⁻¹, respectively, nearly the same as the equilibrium adsorption capacities obtained under the experiment conditions. And the liquid diffusion process was a rate-limiting step of the adsorption of f2 phage by both anthracite and steel slag, but not the only one. The results of dynamic adsorption experiments showed that the adsorption process of f2 phages in the three adsorption columns including anthracite, steel slag and zeolite experienced four stages of adaption, adsorption, pulse adsorption and adsorption equilibrium, and the total removal rates of f2 phages were more than 2.55 lg.

Key words: constructed wetland; substrates; f2 phages; virus; adsorption

污水中的病原微生物是传播疾病的主要媒介,近年来暴发的SARS、禽流感等疫情,对污水排放提出了新的卫生学要求^[1,2]。城市污水经过二级处理后,水质得到明显改善,但出水中仍含有一定浓度的有机物、氮磷营养物和病原微生物,是受纳水体的主要污染来源之一^[3,4]。人工湿地用于城市污水厂尾水深度处理,能有效去除水中的有机物、氮磷营养物^[5]和病原微生物^[6],可有效削减进入受纳水体的污染负荷,具有投资少、操作简单、维护和运行

费用低、化学残留少等优点^[7]。因此对于人工湿地的研究和应用得到了广泛关注。

填料是人工湿地的主要组成部分之一。研究表

收稿日期: 2013-01-27; 修订日期: 2013-03-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07209-005); 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金项目(ES201005); 中国科学院生态环境研究中心“一三五”项目(YSW2013B02)

作者简介: 陈迪(1989~),女,硕士,主要研究方向为人工湿地病原微生物污染控制, E-mail: xinmaichen919@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhengxiang7825@163.com; ysw@cees.ac.cn

明人工湿地主要通过吸附作用去除病原微生物^[7,8],不同填料对不同病原微生物的吸附作用存在显著差异^[9]。选择合适的填料不仅是提高人工湿地净化能力的关键^[10],而且有助于提高病原微生物的去除效果。目前关于人工湿地填料的研究主要集中于填料的脱氮除磷性能^[11~14],有关填料对不同病原微生物的吸附特性和吸附机制的报道较少,有待进一步研究。

大肠菌群是常用的水质微生物指标,但水中的病毒具有体积小、抗性和稳定性强、致病率高等特点^[15],因此以病毒作为水质微生物指标具有更显著的环境卫生学意义^[16]。由于直接检测水中病毒操作较复杂且安全性较差,通常选用噬菌体评估水体的病毒学安全性^[17,18]。本研究选用f2噬菌体作为水体病毒的指示生物,其为正二十面体结构,直径24~26 nm,遗传物质为ssRNA,与人类肠道病毒(正二十面体,直径17~28 nm,ssRNA)在形态特征、环境持久性、抗性耐性都极为相似^[19],且对人类健康的负面影响基本可忽略。

本研究以3种常见人工湿地填料(钢渣、无烟煤、沸石)和一种新开发的填料(镁橄榄石)^[20]为对象,分析其对f2噬菌体的吸附特性,探讨其对病毒的吸附机制,以期在选择合适的人工湿地填料提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 湿地填料

试验所用4种填料分别为钢渣、无烟煤、沸石和镁橄榄石。其中钢渣来自河北唐山钢铁公司炼钢厂高炉转炉渣,无烟煤和沸石来自北京普林森环保有限公司,镁橄榄石来自湖北宜昌石金科技发展有限公司。上述材料使用前均用去离子水清洗并浸泡12 h,105℃干燥24 h后备用。

1.1.2 噬菌体

噬菌体和宿主:f2噬菌体及其宿主菌 *E. coli* 285 均购于军事医学科学院卫生学环境医学研究所。培养 *E. coli* 285 的液体培养基成分如下:蛋白胨10.0 g,牛肉膏3.0 g,氯化钠5.0 g,加入1 000 mL去离子水,将pH值调至7.3左右。上层和下层培养基中,琼脂添加量分别为0.8%和1.2%~1.5%(质量分数)。培养基在121℃的高压蒸汽灭菌锅中灭菌20.0 min后备用。

按照ISO标准制备f2噬菌体浓缩液^[21],包括宿

主菌培养、噬菌体接种培养和离心分离等步骤^[16],f2噬菌体浓缩液的浓度约 $10^9 \sim 10^{10}$ PFU·mL⁻¹,浓缩液密封后置于4℃冰箱保存备用。

1.2 试验方法

1.2.1 静态吸附试验

(1)填料吸附效果 分别称取10.0 g的4种填料于100 mL锥形瓶中,灭菌后加入100 mL无菌去离子水和1.0 mL f2噬菌体浓缩液(浓度 3.55×10^9 PFU·mL⁻¹)。恒温恒速(25℃、200 r·min⁻¹)振荡至吸附平衡后离心(4 000 r·min⁻¹,5.0 min),测定上清液噬菌体浓度。空白对照组仅加入无菌去离子水和噬菌体浓缩液;每组试验做2个重复,噬菌体检测计数做2个平行。

(2)等温吸附试验 分别称取10.0 g填料(钢渣、沸石和镁橄榄石)于100 mL锥形瓶中,灭菌后加入100 mL无菌去离子水和1 mL浓度分别为 1.03×10^6 、 1.03×10^7 、 1.03×10^8 、 1.03×10^9 和 1.03×10^{10} PFU·mL⁻¹的f2噬菌体浓缩液(PBS稀释)。振荡离心、噬菌体检测、空白对照及平行试验设计同上。

(3)填料投加量优化 针对吸附效果最好的填料,分别称取1.0、2.0、4.0、6.0、8.0和10.0 g无烟煤于100 mL锥形瓶中,灭菌后分别加入100 mL无菌去离子水和1 mL f2噬菌体浓缩液(浓度 1.03×10^{10} PFU·mL⁻¹)。振荡离心、噬菌体检测、空白对照及平行试验设计同上。

(4)吸附动力学试验 分别称取10.0 g的4种填料于100 mL锥形瓶中,灭菌后加入100 mL无菌去离子水和1.0 mL f2噬菌体浓缩液(浓度 3.55×10^9 PFU·mL⁻¹)。恒温恒速(25℃、200 r·min⁻¹)振荡,分别在第0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0和8.0 h取样,水样离心(4 000 r·min⁻¹,5.0 min)后测定上清液f2噬菌体浓度。空白对照及平行试验设计同上。

1.2.2 动态吸附试验

称取无菌且已干燥恒重的钢渣、无烟煤、沸石分别装入3支有机玻璃吸附柱,内径50.0 mm,有效高度600.0 mm(前期试验表明,镁橄榄石吸附效果较差,在此不予研究),采用上流式进水。首先连续通入去离子水以排除填料孔隙间的空气,然后启动蠕动泵(BT100-1J,保定兰格恒流泵有限公司,中国)并开始计时,一定时间后取样分析。试验进水采用自来水配制,投加f2噬菌体使进水浓度约 $10^5 \sim 10^6$ PFU·mL⁻¹。吸附柱的运行参数如表1所示。

表 1 吸附柱运行参数

Table 1 Operational parameters of adsorption columns

填料	半径 /mm	填充高度 /mm	空床体积 /L	填充量 /g	水力负荷 /m ³ ·h ⁻¹	空床接触时间 /h
钢渣	25	600	1.178	1 050	0.3	2.0
无烟煤	25	600	1.178	778	0.3	2.0
沸石	25	600	1.178	490	0.3	2.0

1.3 分析方法

1.3.1 噬菌体检测

采用双层琼脂平板法^[22], 首先将所测样品进行 10 倍系列稀释, 稀释液为 0.03 mol·L⁻¹ 磷酸缓冲液 (PBS), 然后将上层培养基 (5.0 mL)、宿主菌 (0.2 mL) 与待测噬菌体样品 (1.0 mL) 混合均匀, 倒入已凝固的下层培养基 (20.0 mL) 上, 摇动使之铺匀倾倒后, 置于 37℃ 生化培养箱中培养, 4.0 ~ 6.0 h 后计数空斑单位 (PFU), 取噬菌斑数在 30 ~ 300 个之间的平皿计算, 一个 PFU 计为一个具有感染活性的噬菌体。

1.3.2 理化指标

pH 值采用 pH 计 (FE20, 梅特勒-托利多公司, 美国) 测定; 电导率采用多功能测定仪 (HI4321, HANNA 公司, 意大利) 测定; 采用扫描电镜-X 射线能谱分析仪 (FEI QUANTA 200, HITACHI, 日本) 分别测定填料表面微观结构和成分。

1.4 计算方法

填料吸附量^[10]按公式(1)计算:

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t) \cdot V}{m} \quad (1)$$

式中, q_t 为 t 时刻填料对 f2 噬菌体的吸附量, PFU·g⁻¹; c_0 为 f2 噬菌体初始浓度, PFU·mL⁻¹; c_t 为 t 时刻 f2 噬菌体浓度, PFU·mL⁻¹; V 为溶液体积, mL; m 为填料的质量, g。

2 结果与讨论

2.1 填料基本特性

利用扫描电镜-X 射线能谱分析仪对 4 种填料分别进行了表面结构和元素含量分析, 各填料元素含量如表 2 所示。

2.2 静态吸附试验

2.2.1 吸附效果

静态试验结果表明, 在噬菌体初始浓度为 7.55 lg PFU·mL⁻¹ 的条件下, 达到吸附平衡后 4 种填料上清液中 f2 噬菌体浓度见图 1, 其中沸石和镁橄榄石的吸附效果较差, 噬菌体去除率 < 0.20 lg; 无烟煤

表 2 4 种填料的元素组成 (质量分数) /%

Table 2 Element composition of the four substrates /%

元素种类	钢渣	无烟煤	沸石	镁橄榄石
C	16.49	64.27	9.82	7.93
O	34.23	22.91	40.67	36.73
Na	0.46	0.36	0.53	0.23
Mg	0.81	0.18	0.97	26.02
Al	13.38	3.81	7.41	1.18
Si	23.19	3.69	33.03	18.68
K	1.84	0.22	1.81	0.30
Ca	4.43	0.19	3.03	1.73
Fe	5.17	2.94	2.12	5.44

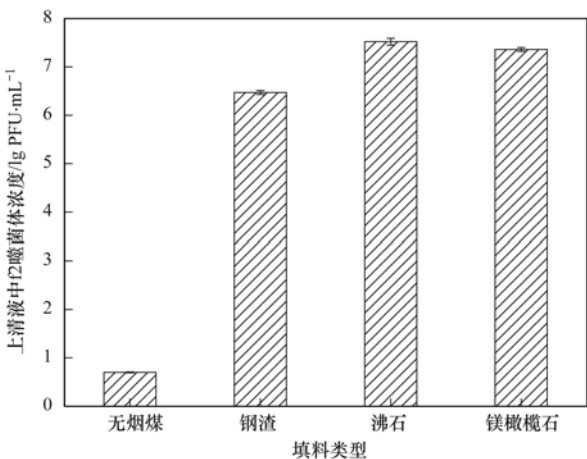


图 1 4 种填料对 f2 噬菌体吸附效果

Fig. 1 Absorption performance of f2 phages by the four substrates

和钢渣对 f2 噬菌体的去除率分别为 6.85 lg 和 1.08 lg。4 种填料对噬菌体的去除效果依次为无烟煤 > 钢渣 > 镁橄榄石 ≈ 沸石。

2.2.2 吸附过程

无烟煤、钢渣、沸石和镁橄榄石分别在第 6.0、6.0、3.0 和 5.0 h 达到 f2 噬菌体吸附平衡 (图 2), 其中去除效果最优的无烟煤对 f2 噬菌体的吸附经历了快 (0 ~ 1.0 h)、中 (1.0 ~ 4.0 h)、慢 (4.0 ~ 6.0 h) 3 个阶段, 这与纳米 TiO₂ 吸附 f2 噬菌体的过程基本保持一致^[23]。在 0 ~ 1.0 h, f2 噬菌体浓度快速下降, 吸附速率较快, 第 1 h 的对数去除率已达 4.16 lg, 这是由于吸附初期填料表面吸附点位较充分, 能

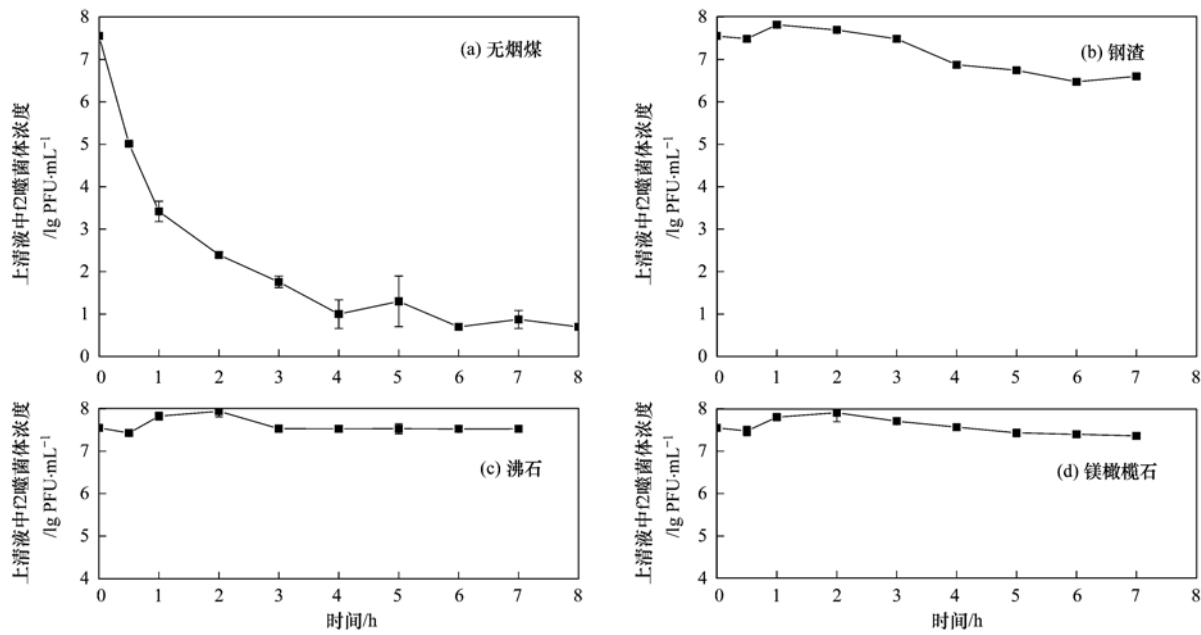


图2 4种填料静态吸附过程中f2噬菌体浓度的变化曲线

Fig. 2 Changes of f2 phages concentration during the adsorption by the four substrates

充分发挥吸附功能;在第1.0~4.0 h,随着吸附反应的进行,填料表面吸附点位逐渐被利用,吸附能力逐渐达到饱和,但吸附反应仍缓慢进行,这导致f2噬菌体浓度继续下降,但吸附速率变缓,在3.0 h内f2噬菌体对数去除率增加了2.45 lg;在第4.0~6.0 h,吸附反应基本趋于平衡,上清液f2噬菌体浓度在吸附-解吸作用下基本保持平衡。

2.2.3 吸附等温线

吸附等温线可定性描述物质的吸附过程^[24],确定平衡吸附量,反映吸附剂对吸附质亲和力强弱和容量大小^[23]。目前应用最广泛的是Freundlich和Langmuir等温吸附模型^[25],将本组试验数据分别按这2种模型进行回归分析,拟合结果如表3所示。

表3 4种填料的f2噬菌体吸附等温线拟合结果

Table 3 Adsorption isotherm results of f2 phages by the four substrates

名称	Freundlich		Langmuir		
	R^2	$1/n$	R^2	b	$q_m/\text{PFU} \cdot \text{g}^{-1}$
无烟煤	0.982	0.130	0.899	9.23×10^{-4}	5.24×10^9
钢渣	0.980	0.889	0.999	2.11×10^{-4}	1.79×10^7
沸石	0.994	1.043	0.997	-3.37×10^{-6}	-4.03×10^6
镁橄榄石	0.994	0.752	0.999	-5.08×10^{-6}	-1.00×10^8

4种填料对f2噬菌体的吸附与Freundlich等温吸附模型拟合度较好($R^2 > 0.980$)。可根据 $1/n$ 的值判断填料的吸附能力,一般认为当 $1/n < 0.5$ 时,容易吸附; $1/n > 2$ 时,则难以吸附^[26],由表3知f2噬菌体对于无烟煤而言属于易吸附物质。同时根据Freundlich方程幂函数形式可知 $1/n$ 值反映了填料的吸附特性,即 $1/n > 1$ 时,表现“协同吸附”的特点,病毒的吸附比例随着病毒浓度的增加而增大; $1/n < 1$ 时,表明吸附比例随病毒浓度的增加而降低^[24]。如表3所示,无烟煤、钢渣和镁橄榄石对f2噬菌体的吸附比例随f2浓度的增加而降低,而沸石填料对f2噬菌体的吸附比例随f2浓度的增加而

增大。

对于Langmuir等温吸附模型,4种填料对噬菌体的吸附拟合度也均较好($R^2 > 0.899$)。根据拟合方程得到无烟煤和钢渣的f2噬菌体饱和和吸附量分别为 $5.24 \times 10^9 \text{ PFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.79 \times 10^7 \text{ PFU} \cdot \text{g}^{-1}$,这与Moore等^[27]根据Langmuir方程得到的砂土对脊髓灰质炎病毒的吸附量 $2.50 \times 10^{12} \text{ 个} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的结果较一致,说明病毒在土壤和填料的吸附有类似之处;然而根据吸附等温方程得到沸石和镁橄榄石对f2噬菌体的饱和和吸附量为负值,这不符合生物学原理^[24],可能是由于这两种填料对f2噬菌体的低吸附能力所致。

2.2.4 吸附动力学分析

(1) 吸附动力学过程

对于吸附反应过程,常用准一级或准二级动力学反应模型来描述^[28],2种动力学模型拟合结果见表4,可知准二级吸附动力学能较好地反映无烟煤和钢渣对f2噬菌体的吸附过程($R^2 > 0.996$).且无烟煤和钢渣的f2噬菌体理论平衡吸附量分别为 $3.35 \times 10^8 \text{ PFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.56 \times 10^8 \text{ PFU} \cdot \text{g}^{-1}$,这与本试验条件下得到的平衡吸附量 $3.55 \times 10^8 \text{ PFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $3.25 \times 10^8 \text{ PFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 基本一致.对于沸石和镁橄榄石,准一级吸附动力学不适宜描述其吸附过程($R^2 < 0.500$);对于准二级吸附动力学,尽管沸石拟

合相关系数为0.912,但这两种填料的初始吸附速率 v_0 为负值,不符合生物学原理.分析其原因,可能与这两种填料对f2噬菌体的低吸附能力有关,在达到吸附平衡时两者对f2噬菌体的去除率仅分别为5.34%和35.17%.

准二级动力学模型包含了吸附的所有过程,如外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内扩散等,是基于吸附速率受化学吸附控制的假设,这种化学吸附涉及到吸附剂与吸附质之间的电子共用或电子转移,并能够非常好地描述整个吸附过程^[29].根据上述结果推测,无烟煤和钢渣对f2噬菌体的吸附可能遵循化学吸附机制.

表4 4种填料的f2噬菌体吸附动力学模拟结果

基质类别	准一级		准二级			
	R^2	k_1 / min^{-1}	R^2	理论吸附量 q_e / $\text{PFU} \cdot \text{g}^{-1}$	实际吸附量 q_2 / $\text{PFU} \cdot \text{g}^{-1}$	v_0 / $\text{PFU} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$
无烟煤	0.805	1.976	0.996	3.35×10^8	3.55×10^8	5.04×10^8
钢渣	0.692	0.539	0.996	2.56×10^8	3.25×10^8	6.90×10^7
沸石	0.024	—	0.912	1.73×10^7	1.89×10^7	-3.04×10^7
镁橄榄石	0.418	1.635	0.018	1.90×10^8	1.24×10^8	-3.60×10^7

(2) 吸附过程控制步骤

为进一步确定吸附反应机制和吸附反应的速率控制步骤,采用Boyd液膜扩散方程和Weber-Morris颗粒内扩散速率方程对试验数据进行拟合分析^[30].结果表明,无烟煤对2种模型的拟合相关系数分别为 $R^2 = 0.306$ [颗粒内扩散,图3(a)]和 $R^2 = 0.792$ [液膜扩散,图3(b)],钢渣拟合相关系数分别为 $R^2 = 0.894$ [颗粒内扩散,图4(a)]和 $R^2 = 0.895$ [液膜扩散,图4(b)].

拟合结果表明液膜扩散过程是无烟煤吸附f2噬菌体的速率控制步骤,液膜扩散速率常数 k 为 1.921 min^{-1} .对于钢渣填料,2种模型拟合相关系

数无显著差异,但液膜扩散模型距原点距离更近,说明液膜扩散是钢渣吸附f2噬菌体的速率控制步骤,液膜扩散速率常数 k 为 0.869 min^{-1} .由于拟合方程均不过原点,说明液膜扩散不是无烟煤和钢渣吸附f2噬菌体的唯一控制步骤,其吸附还受其他吸附过程的影响^[23].这也从另一个角度说明,无烟煤和钢渣对f2噬菌体的吸附符合准二级吸附动力学,包含了吸附的所有过程.

2.2.5 填料投加量的优化

以上试验结果表明,无烟煤填料对f2噬菌体吸附效果最优.为了充分发挥填料的吸附作用,对其投加量进行优化研究,试验结果见图5.

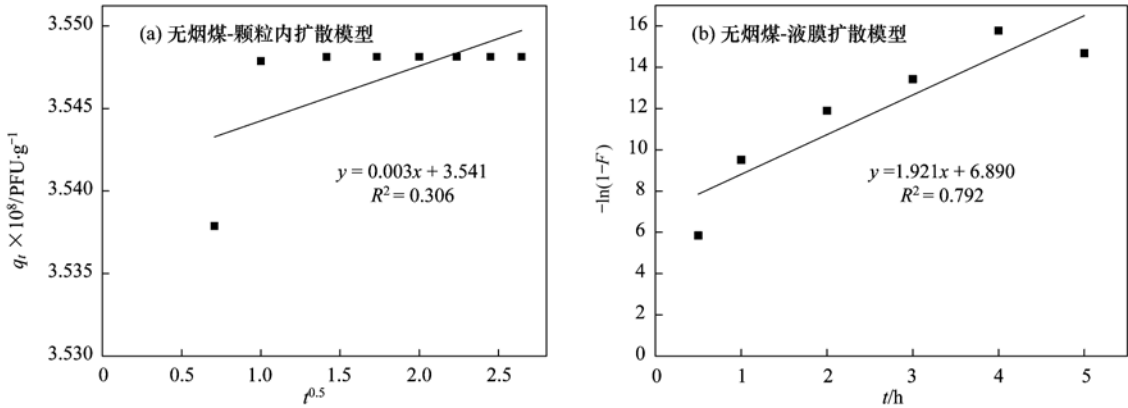


图3 无烟煤吸附f2噬菌体的液膜扩散拟合结果

Fig. 3 Simulation of f2 phages adsorbed by anthracite coal with the liquid diffusion model

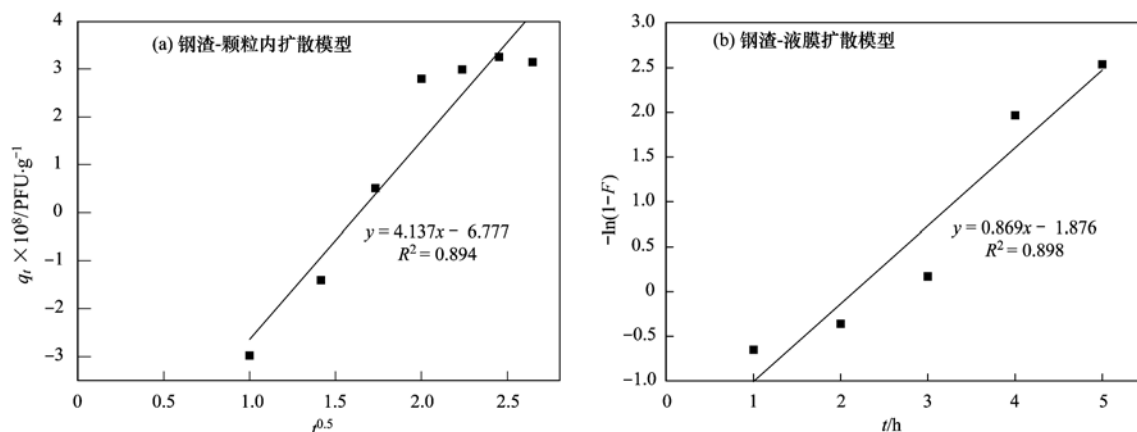


图4 钢渣吸附f2噬菌体扩散过程拟合结果

Fig. 4 Simulation of f2 phages adsorbed by steel slag during diffusion process

f2噬菌体的去除率随无烟煤投加量的增加而逐渐升高(图5)。在初始f2噬菌体浓度为 $8.01 \lg \text{PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的条件下,当无烟煤投加量为 1.0 g (固液比 $1:100$)时,噬菌体去除率为 $0.65 \lg$;当无烟煤投加量增加到 2.0 g (固液比 $1:50$)时,去除率增加到 $2.46 \lg$;当无烟煤投加量增加到 8.0 g 时,上清液f2噬菌体浓度已 $< 10 \text{ PFU} \cdot \text{mL}^{-1}$,对数去除率为 $7.27 \lg$ 。根据以上试验数据,得到优化的无烟煤吸附投加量为 8.0 g (固液比为 $1:12.5$)。

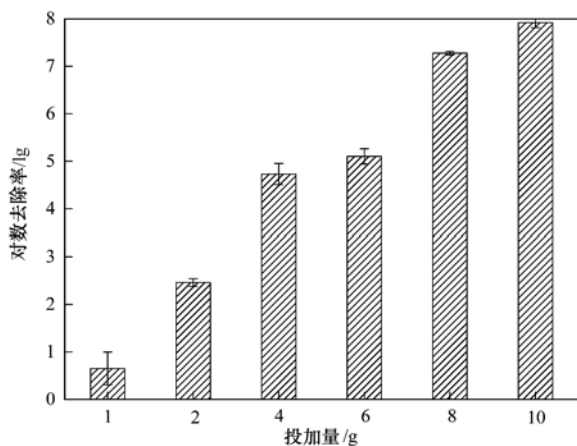


图5 无烟煤投加量对f2噬菌体吸附效果的影响

Fig. 5 Effects of anthracite dosage on f2 phage adsorption

2.3 动态吸附试验

静态吸附试验能有助于探讨填料的吸附效果和吸附机制,而在实际应用中,需进一步通过动态吸附试验确定填料的吸附效果。

2.3.1 噬菌体吸附效果

在 $0.3 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 的水力负荷件下,无烟煤、钢渣和沸石对f2噬菌体的动态吸附去除效果如图6所示。其动态吸附过程可分为适应、稳定吸附、脉冲吸附

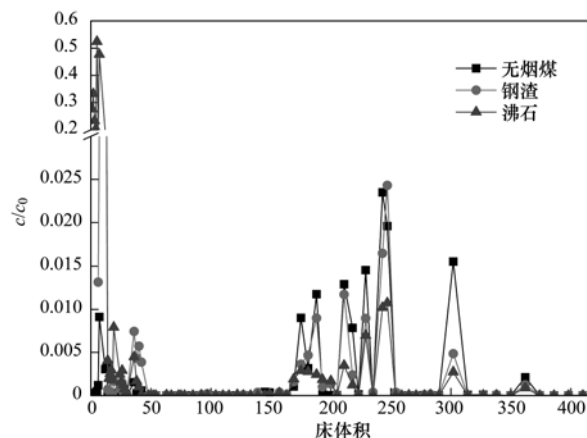


图6 3种填料吸附柱的f2噬菌体动态吸附曲线

Fig. 6 Dynamic adsorption of f2 phages by adsorption columns using the three substrates

和动态平衡这4个阶段。

(1)适应阶段 $0 \sim 50$ 床体积,试验初期系统不稳定,出水噬菌体浓度较高(钢渣、无烟煤和沸石 c/c_0 分别为 $7.450 \times 10^{-4} \pm 0.002$ 、 $2.442 \times 10^{-2} \pm 0.044$ 和 $8.208 \times 10^{-2} \pm 0.151$),填料在13个床体积后逐渐发挥吸附作用,出水f2噬菌体浓度不断降低,并在第50个床体积时降到最低。

(2)稳定吸附阶段 $50 \sim 160$ 床体积,填料持续发挥吸附作用,出水f2噬菌体浓度较低并保持稳定,其中钢渣、无烟煤和沸石 c/c_0 分别为 $4.568 \times 10^{-5} \pm 0.0001$ 、 $6.778 \times 10^{-5} \pm 0.0001$ 和 $4.055 \times 10^{-5} \pm 0.0001$ 。

(3)脉冲吸附阶段 $160 \sim 250$ 床体积,出水噬菌体浓度逐渐增加(钢渣、无烟煤和沸石 c/c_0 分别为 $7.414 \times 10^{-3} \pm 0.008$ 、 $6.117 \times 10^{-3} \pm 0.007$ 和 $3.306 \times 10^{-3} \pm 0.003$)。分析其原因一方面可能为

填料表面吸附点位逐渐被占据,填料吸附能力下降;另一方面可能在较高流速的进水条件下,填料表面吸附的噬菌体发生解吸,使出水浓度升高.但即使在最高出水浓度时,填料柱对噬菌体的去除率仍在97%以上,说明填料对噬菌体的吸附去除作用显著.

(4)动态平衡阶段 250~410 床体积,填料柱出水f2噬菌体浓度进一步下降(钢渣、无烟煤和沸石 c/c_0 分别为 $1.072 \times 10^{-3} \pm 0.004$ 、 $4.143 \times 10^{-4} \pm 0.001$ 和 $2.304 \times 10^{-4} \pm 0.0006$),并保持动态平衡.可能由于第3阶段部分填料表面的噬菌体解吸,或者吸附的噬菌体逐渐灭活,使得填料的吸附点位重新具有吸附作用,进而使得出水噬菌体浓度降低.并且吸附柱只吸附-解吸间保持动态平衡,出水噬菌体浓度基本保持稳定,平均对数去除率稳定在2.5 lg以上.

基于微生物的生物活性特点,填料对噬菌体的吸附不同于常规污染物.湿地填料吸附f2噬菌体的动态试验结果表明,填料柱对f2噬菌体的吸附作用显著,即使在较高水力负荷的条件下,仍能稳定发挥其吸附去除效果.

2.3.2 理化指标

有研究表明钢渣和无烟煤出水分别呈碱性和酸性,不宜直接排入受纳水体^[7].本研究动态吸附柱出水 pH 变化如图7所示,随着运行时间的延长,钢渣吸附柱的出水 pH 逐渐降低,在280个床体积后,逐渐降低到8.5左右;无烟煤和沸石吸附柱的出水 pH 基本保持稳定.

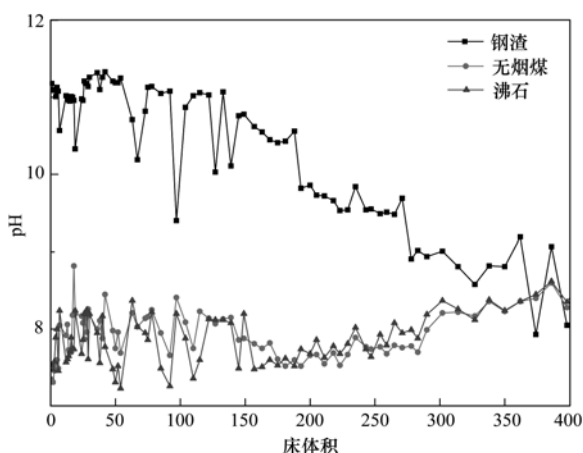


图7 柱试验各填料出水 pH 变化图

Fig. 7 Changes of pH in the effluent of columns with different substrates

对于4种填料对N、P的吸附去除效果,动态柱试验结果表明,钢渣、无烟煤、沸石、镁橄榄石对氨氮的平均去除率分别为30.35%、7.29%、98.87%

和18.49%,对正磷酸盐的平均去除率分别为91.78%、60.50%、32.66%和75.95%^[20].因此,在实际应用中合理配比以上填料,对氮磷和病原微生物都有一定得去除效果,可更有效地发挥人工湿地的净化作用.

3 结论

(1)4种填料对f2噬菌体的静态吸附效果依次为无烟煤>钢渣>镁橄榄石≈沸石,对于去除效果最优的无烟煤,优化投加量为8.0 g(固液比1:12.5).

(2)4种填料对f2噬菌体的吸附满足 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附方程.

(3)无烟煤和钢渣对f2噬菌体的吸附满足准二级吸附动力学,液膜扩散过程为无烟煤和钢渣吸附f2噬菌体的速率控制步骤,但不是唯一控制步骤,其吸附过程还受其他吸附过程的制约.

(4)填料动态吸附试验表明,无烟煤、钢渣和沸石的f2噬菌体吸附过程经历了适应、稳定吸附、脉冲吸附和动态平衡这4个阶段,稳定吸附后的f2噬菌体平均对数去除率 ≥ 2.5 lg.

参考文献:

- [1] 徐敏,宋志文,杨光,等.人工湿地与环境健康安全[J].生态学杂志,2007,26(11):1873-1877.
- [2] 郑祥,吕文洲,杨敏,等.膜生物反应器去除污水中毒素的试验研究[J].科学通报,2005,50(2):117-122.
- [3] 郁达伟,于森,魏源送,等.1980~2010年温榆河的水环境质量时空演变特征[J].环境科学学报,2012,32(11):2803-2813.
- [4] 杨勇,魏源送,郑祥,等.北京温榆河流域微生物污染调查研究[J].环境科学学报,2012,32(1):9-18.
- [5] 管策,郁达伟,郑祥,等.我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究和应用进展[J].农业环境科学学报,2012,12(31):2309-2320.
- [6] 陈迪,杨勇,郑祥,等.人工湿地对病原微生物去除的研究进展[J].农业环境科学学报.
- [7] 李明,周巧红,武俊梅,等.不同填料对人工湿地模拟柱中指示菌的去除[J].生态与农村环境学报,2010,26(1):68-72.
- [8] Vega E, Lesikar B, Pillai S D. Transport and survival of bacterial and viral tracers through submerged-flow constructed wetland and sand-filter system [J]. Bioresource Technology, 2003, 89(1): 49-56.
- [9] Meschke J S, Sobsey M D. Comparative adsorption of Norwalk virus, poliovirus 1 and F + RNA coliphage MS2 to soils suspended in treated wastewater [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(12): 187-189.
- [10] 刘波,陈玉成,王莉玮,等.4种人工湿地填料对磷的吸附特

- 性分析[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(1): 44-48.
- [11] 宋彦青. 水平潜流人工湿地填料的选择与处理富营养化湖水研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. 41-49.
- [12] 王冬梅. 人工湿地填料优选及净化效果试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007. 8-35.
- [13] 王冬梅, 刘培斌, 丁跃元, 等. 人工湿地填料对磷的吸附特性及预期使用年限[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(4): 17-21.
- [14] 赵发敏. 人工湿地填料基质去除氨氮和磷最优配比及影响因素研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011. 1-44.
- [15] 李梅, 胡洪营. 噬菌体作为水中病毒指示物的研究进展[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(2): 23-26.
- [16] 郑祥, 刘俊新. MBR 对污水中肠道模型病毒的去除效应[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2007, **37**(4): 390-396.
- [17] 李明, 周巧红, 吴振斌, 等. 人工湿地对病原体去除的研究概况[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12H): 134-138.
- [18] Durán A E, Muniesa M, Méndez X, *et al.* Removal and inactivation of indicator bacteriophages in fresh waters [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2002, **92**(2): 338-347.
- [19] 郑祥, 雷洋, 陈迪, 等. 膜吸附反应器(MAR)对饮用水系统中病毒的去除[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2012, **42**(10): 1479-1486.
- [20] 管策, 王亚伟, 魏源送, 等. 镁橄榄石与钢渣除磷特性的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(7): 1437-1444.
- [21] ISO. 水质-噬菌体的检查和计数[S]. 1995.
- [22] H A M. Bacteriophages[M]. New York: Interscience Publishers Inc, 1959. 443-451.
- [23] 郑祥, 雷洋, 陈迪, 等. 纳米 TiO₂ 对模型病毒——f2噬菌体的吸附特性 [J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2013, **43**(5): 610-617.
- [24] 张丛志, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 我国典型土壤对病毒等温静态吸附的数值模拟[J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1835-1840.
- [25] Powell T, Brion G M, Jagtoyen M, *et al.* Investigating the effect of carbon shape on virus adsorption [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, **34**(13): 2779-2783.
- [26] 张自杰, 林荣忱, 金儒林. 排水工程 [M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 539-541.
- [27] Moore R S, Taylor D H, Sturman L S, *et al.* Poliovirus adsorption by 34 minerals and soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1981, **42**(6): 963-975.
- [28] 张蕾, 刘雪岩, 姜晓庆, 等. 纳米 TiO₂ 对钼(VI)的吸附性能 [J]. 中国有色金属学报, 2010, **20**(2): 301-307.
- [29] 周玉芬, 郑祥, 雷洋, 等. 活性污泥对病毒的生物吸附特性 [J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1621-1624.
- [30] 张蕾, 刘娜, 康平利, 等. 纳米 TiO₂ 对去除水溶液中硒的吸附性能研究[J]. 化学通报, 2009, **72**(11): 1013-1018.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行