

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

活性污泥对病毒的生物吸附特性

周玉芬^{1,2}, 郑祥^{1*}, 雷洋¹, 陈迪¹

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 山西省环境规划院, 太原 030002)

摘要: 针对污水处理过程中可能存在的病原微生物对人体健康的风险, 以 $\phi 2$ 噬菌体为模型病毒, 采用静态吸附方法, 研究病毒在活性污泥上的生物吸附特性及其影响因素, 以期了解病毒在活性污泥处理系统中固液两相体系的分配规律. 结果表明, 活性污泥对病毒的吸附速率快, 吸附量大, 在 120 min 时即能达到吸附平衡, 平衡吸附率高达 96% 以上, 对病毒的去除效果较为理想; 该吸附符合 Freundlich 吸附等温式, 且吸附率随着病毒浓度的增加而呈现出下降趋势; 另外, pH 值、金属阳离子浓度及有机物浓度均可显著影响病毒在活性污泥上的吸附.

关键词: 城市污水; 活性污泥; 模型病毒; 吸附动力学; 吸附等温线

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)05-1621-04

Biosorption Characteristics of $\phi 2$ Bacteriophage onto Activated Sludge

ZHOU Yu-fen^{1,2}, ZHENG Xiang¹, LEI Yang¹, CHEN Di¹

(1. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. Shanxi Academy for Environmental Planning, Taiyuan 030002, China)

Abstract: A series of static adsorption experiments by activated sludge were conducted for virus removal with $\phi 2$ bacteriophage, which was seeded with a high concentration as surrogates for human enteric viruses. Adsorption kinetics had shown equilibrium conditions were established in some 120 minutes and the activated sludge could get rid of more than 96% $\phi 2$ bacteriophage, with 85% of total adsorption occurring in less than an hour. Freundlich isotherm model adequately described the adsorption which indicated that the removal mechanism of virus is based on a multilayer adsorption in such a heterogeneous aqueous solution system. Adsorption capacity was found to vary with pH value, metallic cation concentration and organic content in wastewater, demonstrating the importance of these parameters for the removal of virus.

Key words: wastewater; activated sludge; model virus; adsorption kinetics; adsorption isotherm

城市污水中存在大量病原微生物, 据研究报道, 未经处理的城市污水中含有的病毒数目为 $7 \times 10^3 \sim 10^5$ PFU $\cdot$ mL⁻¹ 以上^[1]. 污水中病毒主要是肠道病毒(如脊髓灰质炎病毒、柯萨奇病毒)和轮状病毒及肝炎病毒等^[2]. 如果污水中存在的细菌和病毒等病原微生物没有得到高效去除, 当其回用于喷灌农作物、公园绿地、运动场及娱乐景观用水等与人体暴露接触时, 会给人类健康和环境安全造成风险^[3]. 与细菌相比, 病毒对消毒过程具有较高抗性, 在水环境中能存活更长的时间^[4,5], 而且极低剂量的病毒即可感染并可致病(包括肝炎、无菌性脑膜炎和心肌炎等), 其后果轻者不适, 重者死亡, 对人体健康构成的威胁更为巨大^[6,7]. 众多的调查和研究结果均表明病毒有可能在土壤和地下水等环境介质中大范围迁移^[8], 极易造成传染性疾病的传播. 虽然目前国际上开始广泛关注病毒在水环境中的行为趋势, 但相关研究工作多以病毒在土壤和地下水中迁移的过程和机制为主, 对病毒在污水处理系统中的去除及灭活规律等缺乏系统、深入的研究. 活性污泥法是我国污水处理厂目前最常用的二级处理工艺之一,

但单独对活性污泥对病毒的去除进行考察的研究较少, 因此对活性污泥生物吸附病毒的效果与机制等进行研究就显得十分有意义, 使出水水质在满足有机污染物和氮磷的常规要求的同时, 也能够实现对病毒的有效去除, 从而为回用水的公共卫生安全提供保障. 另外, 大部分被污泥吸附的病毒并没有实现灭活^[9], 考察污泥对病毒的吸附程度对污泥农用、污泥处置的安全性也具有一定指导意义.

为深入了解病毒在活性污泥中固液两相的分配规律, 本研究选择典型的 RNA 肠道模型病毒—— $\phi 2$ 噬菌体为对象, 对活性污泥吸附病毒的动力学、吸附等温线以及影响因素进行探讨. 并在此基础上初步分析了活性污泥对 $\phi 2$ 噬菌体吸附反应的机制, 以期为进一步研究病毒在活性污泥生物处理系统中的去除提供依据与指导.

收稿日期: 2011-05-13; 修订日期: 2011-09-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项项目(10XNJ023)

作者简介: 周玉芬(1984~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境病毒学

* 通讯联系人, E-mail: zhengxiang7825@hotmail.com

1 材料与方法

1.1 噬菌体的制备

φ2 噬菌体及其宿主菌 *E. coli* 285 由军事医学科学院卫生学环境医学研究所购得. 培养 *E. coli* 285 的培养基成分如下: 蛋白胨 10 g, 牛肉膏 3 g, 氯化钠 5 g, 加入 1 000 mL 去离子水, pH 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%. 培养基需在 121℃ 的高压蒸汽灭菌锅中灭菌 20 min 以备使用.

φ2 噬菌体浓缩液制备方法如下: 宿主细胞接入斜面, 37℃ 下培养 18 h; 由斜面接入液体培养基, 37℃ 下 150 r·min⁻¹ 摇床培养 12 h; 将所得液体培养物 1 mL 接入 100 mL 液体培养基, 在 37℃ 下振荡培养 6 ~ 8 h. 接入一接种环噬菌体, 继续培养 6 ~ 8 h, 然后加入预先培养 6 h 的幼龄宿主细胞培养物 100 mL, 继续培养 12 ~ 14 h; 培养混合物经 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 取上清液, 用 0.22 μm 微孔滤膜过滤. 滤过液即为 φ2 噬菌体浓缩液.

1.2 吸附试验方法

活性污泥取自北京清河污水处理厂曝气池混合

液, 经 4 000 r·min⁻¹ 离心 15 min 而得, 试验中将 MLSS 调节至 2 000 mg·L⁻¹. 采用模拟废水 (蔗糖 27.5 g; Na₂CO₃ 33 g; NH₄Cl 7.5 g; KH₂PO₄ 0.6 g; K₂HPO₄ 2.5 g; 去离子水 1 000 mL; COD 为 30 000 mg·L⁻¹) 为吸附反应基质母液, 使用时根据需要稀释.

取一定体积的 φ2 噬菌体 (除动力学与吸附等温线试验外, 噬菌体浓度均控制为 10⁶ PFU·mL⁻¹) 加入 250 mL 锥形瓶中, 装入 100 mL 活性污泥与模拟废水的混合稀释液 (MLSS = 2 000 mg·L⁻¹, 除有机物浓度试验系列外 COD 均为 3 000 mg·L⁻¹), 摇匀 2 min, 放入摇床中恒温摇荡 (150 r·min⁻¹, 37℃) 进行吸附反应. 然后在一定时间间隔取锥形瓶内混合液, 离心分离 (4 000 r·min⁻¹, 15 min) 后, 收集上清液测定其中的噬菌体浓度. 根据吸附前后 φ2 噬菌体浓度差、活性污泥投加量等进行相关计算.

本研究进行了 5 组试验 (吸附动力学试验、吸附等温线试验、pH 值影响试验、金属阳离子影响试验、有机物浓度影响试验, 见表 1), 除吸附动力学试验外, 其余均在吸附反应 2 h 后取样分析 (根据前面的吸附动力学曲线确定 2 h 已经达到吸附平衡).

表 1 不同试验组的对照项目及其取值

Table 1 All of the experiments and the settings of items

试验组	项目	取值
吸附动力学	φ2/PFU·mL ⁻¹	2.50 × 10 ⁸ 、1.70 × 10 ⁷ 、6.40 × 10 ⁵ 、3.10 × 10 ³
	t/min	30、60、90、120、150
吸附等温线	φ2/PFU·mL ⁻¹	1.70 × 10 ⁸ 、1.25 × 10 ⁷ 、5.05 × 10 ⁶ 、1.70 × 10 ⁵ 、5.00 × 10 ⁴ 、5.00 × 10 ³
pH 值因子	pH	5.0、6.0、7.0、8.0、9.0
金属阳离子因子	Ca ²⁺ /mol·L ⁻¹	0.00、0.05、0.10、0.20
有机物浓度因子	COD/mg·L ⁻¹	500、1 000、3 000、5 000、10 000

1.3 分析方法

采用双层琼脂培养法对 φ2 噬菌体浓度进行测定^[10]. 水样用 0.03 mol·L⁻¹ PBS 缓冲液做梯度稀释或不稀释. 接种后的培养皿在 37℃ 的恒温箱中培养 4 ~ 6 h 后, 计每皿上的噬菌斑数. 噬菌体浓度用每 mL 体积水样的噬菌斑形成单位 PFU 表示. 溶液 pH 值采用 pH S-3C 酸度计测定.

1.4 计算方法

吸附量

$$q(\text{PFU} \cdot \text{mg}^{-1}) = 1\,000 \times (c_0 - c_t)/c_A \quad (1)$$

吸附率

$$\eta(\%) = 100 \times (c_0 - c_t)/c_0 \quad (2)$$

式中, t 为吸附反应时间 (min); c_0 与 c_t 分别为初始时刻和 t 时刻 φ2 噬菌体的浓度 (PFU·mL⁻¹); c_A 为活性污泥投加浓度 (mg·L⁻¹).

2 结果与讨论

2.1 不同病毒浓度下的吸附动力学

溶液中的吸附是一个复杂的过程, 吸附质从液相中被吸附到吸附剂颗粒中, 可以分为吸附剂周围流体界膜中吸附质的迁移 (外扩散)、吸附剂颗粒内扩散和吸附剂内的吸附反应等过程^[11]. 为了研究吸附的机制, 设计高效的吸附工艺, 确定接触吸附的时间, 对吸附动力学和传质过程进行分析就显得十分重要.

病毒在悬浮物上的吸附主要依赖于吸附剂与吸附质两者的表面结构特性与化学组成等. 黏土物质对病毒的最大吸附作用可能在瞬间完成, 也可能需要十几分钟, 甚至几十个小时^[12]. 本试验的研究结果表明 (图 1), 活性污泥对 φ2 噬菌体的吸附主要在前 60 min 内完成完, 吸附率已经超过 85%, 其后吸

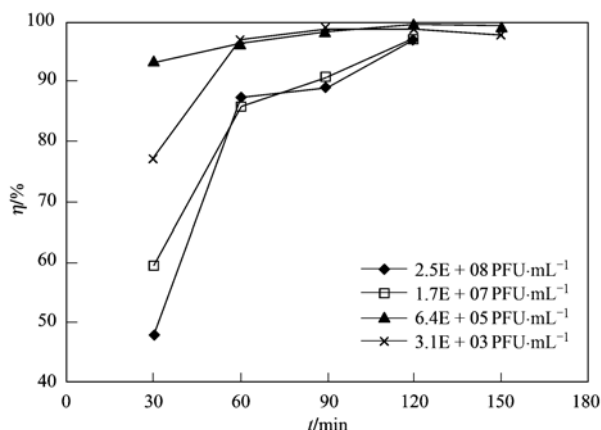


图1 活性污泥对 f2 噬菌体的吸附动力学

Fig. 1 Adsorption kinetics of f2 phage onto activated sludge

附率提升较小,最终在 120 min 内达到平衡. 试验显示,不同病毒浓度下的吸附率均在 96% 以上,病毒浓度对最终吸附率影响不大,但因为高浓度病毒所带来的高污染负荷,会导致整个过程中吸附率提升的速度减慢.

2.2 活性污泥对病毒的吸附等温线

吸附等温线反映不同平衡浓度下吸附剂对吸附质的平衡吸附量,是吸附剂对吸附质亲和力强弱和容量大小的重要表征. 目前有多种不同的等温吸附模型,但其中应用最为广泛的是 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型^[13]. 将本组试验数据分别按这 2 种模型进行回归分析发现,活性污泥对 f2 噬菌体的吸附与 Freundlich 模式有相当好的符合 ($q_e = 6.3885 \cdot c_e^{0.9353}$, 图 2), R^2 高达 0.9947. 说明活性污泥对 f2 噬菌体的吸附更接近于非均质的、多层的吸附类型. Freundlich 等温吸附的标准方程为 $q_e = kc_e^{1/n}$, 本试验组的 $1/n$ 为 0.9353, 证明 f2 噬菌体对活性污泥而言,属于较易吸附类吸附质,适合应用于水处理工艺中. 而 Langmuir 等温吸附方程式由于受高浓度限制的适用条件,不能恰当地描述 f2 噬菌体

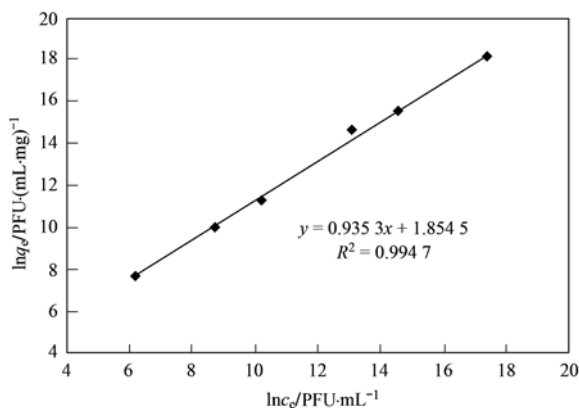


图2 f2 噬菌体 Freundlich 模式吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherm of f2 phage onto activated sludge

在活性污泥上的吸附规律.

2.3 pH 值对病毒吸附的影响

溶液的 pH 值决定反应体系内游离的 H^+ 与 OH^- 的浓度,会对吸附剂与吸附质的稳定性、分散性、物种形成与带电状态产生一定的影响,从而进一步影响吸附剂对吸附质的吸附作用. 本试验结果显示(图 3),水体环境 pH 值对活性污泥吸附 f2 噬菌体影响较大. pH 值为 5.0 时活性污泥对 f2 噬菌体的吸附作用最大,吸附率达到 96.54%. 当 pH 值逐渐升高时,吸附能力有所下降. 由此可见酸性条件下更有利于吸附的发生. 这可能是由于病毒外壳因 pH 值发生变化而发生质子化或非质子化反应. 病毒外表为蛋白质外壳,所含羧基及氨基决定病毒表面的净电价. 当 pH 值增加时,羧基离子化增加,氨基离子化减少,病毒表面的净电价呈现负电价. 噬菌体的等电点 (pI) 一般在 3~6 之间,而活性污泥表面一般带负电荷, pH 值较高时,噬菌体与活性污泥间的静电斥力增加,病毒较容易以游离形式存在,从而使得吸附量减少;反之在低 pH 值时噬菌体更容易被吸附. 另一方面,可能 f2 噬菌体与 OH^- 存在着竞争吸附, pH 值上升, OH^- 增加,减少了吸附点位,从而降低吸附能力.

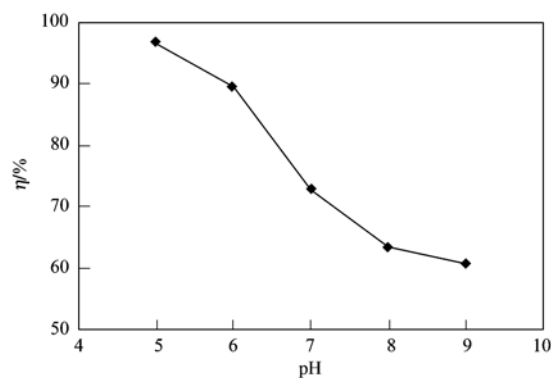


图3 pH 值对活性污泥吸附 f2 噬菌体的影响

Fig. 3 Effect of pH value on adsorption performance

2.4 金属阳离子浓度对病毒吸附的影响

溶液中离子浓度的变化会引起病毒粒子表面带电情况的变化,从而影响病毒在活性污泥中的吸附和解吸. 高价阳离子(例如 Ca^{2+}) 还能引起活性污泥中的细菌絮凝,从而改变活性污泥的结构与性质,影响病毒在活性污泥中的吸附解吸行为. 试验结果显示(图 4),在模拟废水中加入一定浓度的 $CaCl_2$ 可提高活性污泥对 f2 噬菌体的吸附能力. 有文献指出^[12],在蒸馏水中加入 $10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $MgCl_2$ 和 $CaCl_2$ 及 $10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl,可

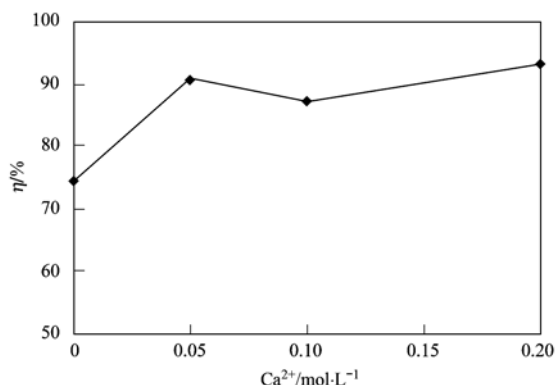


图4 Ca^{2+} 浓度对活性污泥吸附 $\phi 2$ 噬菌体的影响

Fig. 4 Effect of Ca^{2+} concentration on adsorption performance

显著地提高高岭土对 TMV 病毒的吸附能力. 本研究中投加 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ 时, $\phi 2$ 噬菌体的吸附率由 74.44% 显著增加到 90.58%, 但随着 Ca^{2+} 浓度升高, 吸附率增加量却不大. Ca^{2+} 促进病毒吸附作用可能是由于高的离子强度压缩了胶体稳定态的双电层结构, 从而增加病毒的吸附速率. 而加入更多 Ca^{2+} 时 $\phi 2$ 噬菌体吸附率升高并不大, 这可能与过高的离子浓度抑制了活性污泥中细菌等的活性, 从而造成 ECP 分泌下降有关. 此外, Ca^{2+} 增大时, 活性污泥中发生细菌絮凝, 活性污泥形成更稳定、更紧密的结构, 污泥比表面积减小, 降低噬菌体的吸附能力. Ca^{2+} 浓度的变化亦可以改变病毒表面的荷电情况, 但与前者相比影响更小.

2.5 有机物浓度对病毒吸附的影响

污水的 COD 浓度对活性污泥吸附 $\phi 2$ 噬菌体具有显著的影响. 试验结果显示(图 5), 随着 COD 浓度的升高, 活性污泥对病毒的吸附能力平稳下降. 这可能是由于活性污泥系统中所含较高浓度的 COD 时减少了病毒吸附点位, 或者因为大分子有机物不利于活性污泥对病毒的吸附. 反应完成后立即测定上清液中的 COD 浓度, 结果显示, 其 COD 浓度均具

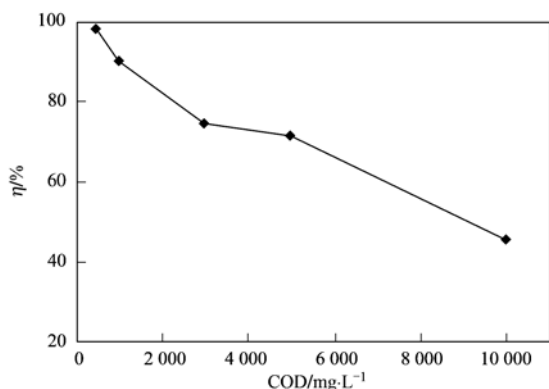


图5 COD 浓度对活性污泥吸附 $\phi 2$ 噬菌体的影响

Fig. 5 Effect of COD concentration on adsorption performance

有较大幅度的下降. 这主要是活性污泥对 COD 的吸附与生物降解作用. COD 以及 COD 降解过程中的中间产物会吸附于活性污泥, 占据了大量吸附点位, 与 $\phi 2$ 噬菌体之间形成竞争吸附, 导致活性污泥对 $\phi 2$ 噬菌体的吸附率明显下降.

3 结论

(1) $\phi 2$ 噬菌体在活性污泥中的吸附和解吸在 120 min 内达到吸附平衡, 平衡吸附率在 96% 以上. 活性污泥对 $\phi 2$ 噬菌体的吸附具有吸附量大、吸附速度快等优点. $\phi 2$ 噬菌体投加浓度对最终吸附率影响不大.

(2) $\phi 2$ 噬菌体在活性污泥中的吸附符合 Freundlich 吸附等温式.

(3) 污水 pH 值、金属阳离子浓度及有机物浓度均可显著影响 $\phi 2$ 噬菌体在活性污泥上的吸附. 随着 pH 值的升高, 由于其改变了吸附剂与吸附质的表面特性, 噬菌体的吸附率逐渐降低; 在模拟废水中加入一定浓度的 Ca^{2+} 可提高活性污泥对 $\phi 2$ 噬菌体的吸附能力; 随着有机物浓度的升高, 由于竞争吸附, 活性污泥对 $\phi 2$ 噬菌体的吸附能力平稳下降.

参考文献:

- [1] 比顿 G, 著, 王小平, 等, 译. 环境病毒学导论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986.
- [2] 仇付国, 王晓昌. 城市回用污水中病毒对人体健康风险的评价[J]. 环境与健康杂志, 2003, 20(4): 197-199.
- [3] Zheng X, Liu J X. Mechanism investigation of virus removal in a membrane bioreactor[J]. Water Science and Technology, 2006, 6(6): 51-59.
- [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] 郑祥, 吕文洲, 杨敏, 等. 膜生物反应器去除污水中病毒的试验研究[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 117-122.
- [6] 张楚瑜, 李军, 李丕芬, 等. 武昌东湖水中病毒的分离鉴定[J]. 中国环境科学, 1983, 3(4): 55-62.
- [7] 王玉福. 现代卫生微生物学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1999. 24-80.
- [8] Abbaszadegan M, Stewart P W, Le Chevallier M W, et al. Occurrence of viruses in groundwater in the United States[M]. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 1999.
- [9] 郑耀通, 林奇英, 谢联辉. 废水活性污泥处理过程去除 TMV 效果研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 625-632.
- [10] Adams M H. Bacteriophages[M]. New York: Interscience Publishers Inc, 1959. 443-451.
- [11] 钟倩倩, 岳钦艳, 李倩, 等. 改性麦草秸秆对活性艳红的吸附动力学研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(1): 133-139.
- [12] 郑耀通. 闽江流域福州区段水体环境病毒污染、存活规律与灭活处理[D]. 福建: 福建农林大学, 2002.
- [13] 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.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人