

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505)	
《环境科学》征订启事 (1682)	
信息 (1339, 1459, 1612)	

分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性

杨波^{1,2}, 丁凤友^{1,2}, 徐辉^{1,2}, 李方^{1,2}, 田晴^{1,2}, 马春燕^{1,2}

(1. 国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心, 上海 201620; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 在好氧、厌氧、好氧/厌氧交替条件下, 采用活性污泥系统生物处理分散染料 neocron black (NB), 研究分散染料 NB 在需氧或者厌氧状态下的生物降解特性以及外加碳源对其生物降解特性的影响, 并全波段扫描和气相色谱-质谱联用 (GC-MS), 初步探讨该染料的生物降解过程。结果表明, NB 染料在好氧条件下降解效率最高, 厌氧/好氧交替条件次之, 厌氧条件下染料降解效率最低。随着 NB 染料浓度的增加, 由于染料和中间代谢产物的抑制作用, 微生物对染料的降解效率逐渐下降。添加易生物降解碳源可以促进 NB 染料的生物降解过程, 并改变生物降解过程的动力学特征。全波段扫描和 GC-MS 测定结果显示, NB 染料经过生物降解作用后, 发色基团得到较彻底降解, NB 染料生物降解中间产物有 2,4-二硝基苯胺、2-氰基-4-硝基苯胺、对硝基苯胺等。

关键词: 分散染料; neocron black (NB); 生物降解; 好氧; 厌氧; 好氧/厌氧交替

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1520-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201603007

Degradation of the Disperse Dye Neocron Black (NB) by Biological Treatment

YANG Bo^{1,2}, DING Feng-you^{1,2}, XU Hui^{1,2}, LI Fang^{1,2}, TIAN Qing^{1,2}, MA Chun-yan^{1,2}

(1. State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, Shanghai 201620, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The biodegradation characteristics of the azo disperse dye neocron black (NB) were investigated under aerobic, anaerobic and anaerobic/aerobic conditions separately with the activated sludge system, and the biological degradation process of the dye was analyzed by spectrophotometry and gas chromatography mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the degradation efficiency of NB dye was the highest under fully aerobic conditions, followed by the anaerobic/aerobic conditions, and fully anaerobic condition was the lowest. With the increase of the concentration of NB dye, the dye and the intermediate metabolite greatly decreased the microbial degradation efficiency of NB dye. The addition of carbon source could not only promote the biodegradation of NB dye, but also change the kinetic characteristics of the biodegradation process. The spectrophotometry and GC-MS determination results showed that the chromophore was completely degraded after biodegradation of NB dye. The intermediates metabolites of NB dye included 2,4-Dinitroaniline, 2-cyano-4-nitro aniline, *p*-Nitroaniline etc.

Key words: disperse dye; neocron black (NB); biodegradation; aerobic; anaerobic; alternating aerobic/anaerobic condition

据统计,全世界每年约有 28 万 t 纺织染料排入水体^[1]。我国纺织印染业发达,生产规模居世界首位,产生的大量印染废水不仅严重污染水环境,而且进入水体的染料及其中间代谢产物具有致癌、致突变等潜在危害^[2,3];同时,水体的色度也降低了透光度,会导致水生生态系统的破坏^[4]。针对印染废水的处理,物化工艺和生化工艺的合理结合,是目前印染废水处理的最普遍方式。物化法有磁分离法、膜分离法、混凝法、吸附法、高级氧化法、光催化法^[5-8]等,物化法可以高效率处理印染废水,但物化法处理成本相对较高而且容易引起二次污染,比较而言生化法处理成本相对较低,而且污染物通过生物好氧代谢可以得到彻底降解。

分散染料作为聚酯纤维的主要使用染料,广泛应用于纺织印染工业^[9]。在分散染料中含偶氮结构的染料占比最大,偶氮类分散染料具有合成简单、

耐日照强度高、色牢度高等特点。采用厌氧、好氧结合的生物工艺降解偶氮染料时,在厌氧条件下,偶氮染料中的偶氮键在偶氮还原酶作用下断裂导致染料脱色,而后续的好氧条件下某些非特异性酶可以将厌氧条件下产生的芳香胺进一步降解^[10-12]。本文即是针对一种偶氮结构的分散染料 (neocron black, NB), 分别研究其在好氧、厌氧、厌氧/好氧交替条件下的生物降解特性,并通过紫外-可见分光光度计和气相色谱-质谱联用^[13,14],初步推测该染料生物降解过程的中间代谢产物和生物降解途径,研究结果有助于加深对印染废水生物处理过程的认识,以为印染废水生物处理工程设计的工艺优化提供理论依据。

收稿日期: 2016-03-01; 修订日期: 2016-11-08

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (13ZR1401000)

作者简介: 杨波 (1973 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为印染废水处理 and 污泥减量化, E-mail: yangbo@dhu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验所用的 3 个序批式反应器 (R1、R2、R3) 由有机玻璃制成, 其尺寸为 20 cm × 20 cm × 35 cm, 总容积 14 L, 反应容积 10 L. 其中好氧反应器 R1 设置搅拌装置、曝气装置和定时器; 厌氧反应器 R2 设置搅拌装置和定时器; 厌氧/好氧交替反应器 R3 设置搅拌装置、曝气装置和定时器, 反应器厌氧 8 h 后曝气 4 h. 实验期间反应器内温度为 (28 ±

3) °C, 实验装置示意图见图 1.

1.2 实验材料与进水组分

实验接种污泥取自上海市松江污水处理厂二沉池的活性污泥, 实验前对活性污泥进行驯化. 驯化和实验用模拟废水包含营养组分和不同浓度染料, 营养组分如表 1; 污泥开始驯化时染料浓度为 20 mg · L⁻¹, 驯化期间进水染料量以每天 10 mg 递增. 实验期间, 各反应器中污泥浓度为 (3 600 ± 200) mg · L⁻¹, 污泥 SVI (污泥容积指数) 值为 (50 ± 7) mL · g⁻¹.

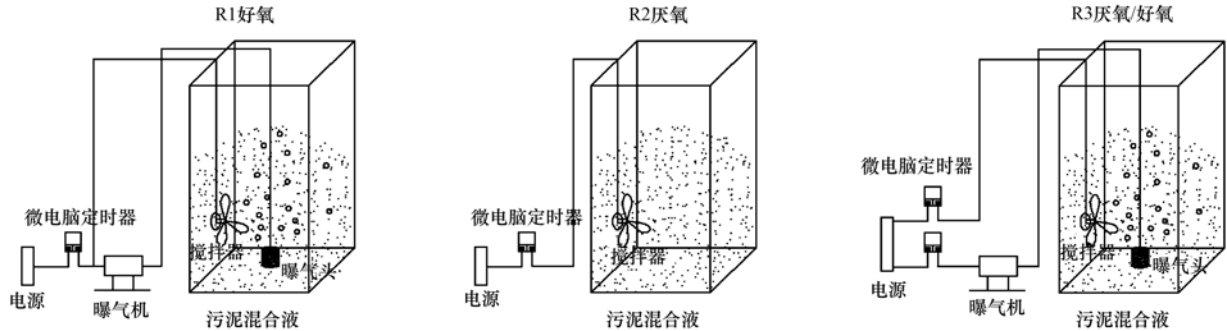


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

表 1 实验用废水营养成分组成¹⁾/mg · L⁻¹
Table 1 Composition of the influent/mg · L⁻¹

营养成分	浓度
葡萄糖	1 000
尿素	25
磷酸氢二钾	7.6
磷酸二氢钾	10
碳酸氢钠	250

1) 废水所提供的 COD 浓度约为 1 050 mg · L⁻¹

实验中所用的分散染料 NB 由 J&J 染料有限公司 (中国台湾) 提供, 该染料属偶氮类分散染料, 分子式为 C₂₁H₂₀N₆O₇, 相对分子质量为 468.42, 其结构式如图 2; NB 染料水样全波段扫描最大吸收波长为 600 nm.

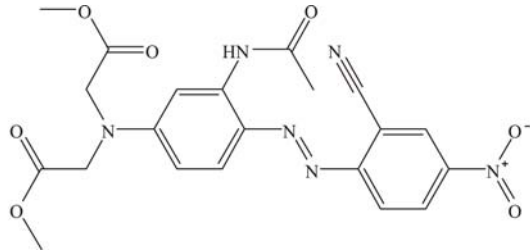


图 2 Neocron black 染料结构式

Fig. 2 Structural formula of neocron black

1.3 分析项目与方法

染料浓度的测定采用分光光度法; COD、MLSS

和 SVI 的测定均采用标准方法^[15]; 染料降解产物的测定采用气相色谱-质谱 (安捷伦 GC7890B/MS5977A) 联用法.

水样经离心 (6 000 r · min⁻¹, 10 min) 后测定 COD 和吸光度值. 进 GC-MS 的样品制备方法如下: 水样先经离心 (6 000 r · min⁻¹, 10 min), 离心后的水样 600 mL 再经 CH₂Cl₂ 萃取得萃取液 200 mL; 萃取采用美国国家环保局方法; EPA3510C 分液漏斗液-液萃取, 萃取过后的样品通过旋转蒸发仪蒸发至 5 mL 后用氮气吹脱至 2 mL, 浓缩后的样品进 GC-MS 测定降解产物. GC-MS 分析条件: 有机物分析采用气相色谱-质谱联机测定, 检测依据为 JY/T021-1996 分析型气相色谱方法通则和 GB/T 6041-2002 质谱分析方法通则 (GC-MS), 所用仪器为安捷伦 GC7890B/MS5977A; 色谱柱: 安捷伦 HP-5MSUI 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm; 进样量: 1.0 μL; 进样口温度: 280 °C; 传输线温度: 280 °C; 离子源温度: 230 °C; 四极杆温度: 230 °C; 柱温: 40 °C (4 min) → 8 °C · min⁻¹ → 300 °C (25 min); 扫描方式: Scan (全扫描); 扫描范围: 30 ~ 1 000 u; EM 电压 1 079 V; MS 电离方式: EI; 灯丝能量: 70 eV; 载气种类: 氦气; 载气流速: 1.0 mL · min⁻¹; 定性方法: NIST2014 谱库为主, 部分化合物用标准化物的保留时间辅助定性.

1.4 关于生物吸附量的测定与讨论^[16]

染料在生物反应器中的去除包括生物吸附和生物降解两方面作用. 分别取 R1、R2、R3 中的污泥混合液各 500 mL 置于 3 个 800 mL 烧杯中, 高压蒸汽灭菌(121℃, 0.103 MPa、20 min)后冷却至常温; 3 个烧杯均加入实验用染料, 使烧杯中染料浓度为 400 mg·L⁻¹. 3 个烧杯中混合液分别在好氧、厌氧、厌氧/好氧条件下对染料吸附 24 h 后, 取混合液离心后测其上清液吸光度, 公式如(1)所示:

$$\eta = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, η : 吸收率; A : 吸附后吸光度; A_0 : 起始吸光度.

计算 3 种条件下污泥对染料的吸附率分别为 4.28%、3.97% 和 4.05%; 但是这并不能真实反映 3 个反应器中的污泥对实验染料生物吸附情况. 后续实验过程中, 在染料和污泥混合后的短时间内, 染料即可获得良好去除效果, 污泥生物吸附作用明显; 究其原因, 经过高压蒸汽处理后的污泥表面胞外聚合物(EPS)受到了破坏, 其吸附性能与新鲜污泥存在显著差异. 考虑到活性污泥对染料吸附作用主要发生在两者混合后的短时间内, 因此本实验选择污泥和染料混合一段时间后(1.5 h 或 2 h)的污染物浓度数据进行分析, 从而减少活性污泥生物吸附作用对染料去除的影响, 认为反应器中染料的去除是通过微生物新陈代谢作用实现的.

2 结果与分析

2.1 反应器对废水 COD 和染料的去除

以特定的染料浓度(染料浓度分别为 100、200、300 和 400 mg·L⁻¹)和表 1 中的营养组分配制不同 COD 浓度进水, 4 种不同染料浓度废水的 COD 浓度分别为 1 338、1 529、1 659 和 1 771 mg·L⁻¹, 在好氧、厌氧、厌氧/好氧交替这 3 种实验条件下, 经过 12 h 微生物作用后, 各不同染料浓度进水在各个反应器中剩余 COD 浓度和染料浓度情况如图 3 和图 4 所示.

图 3 和图 4 中, 经过 12h 微生物作用后, 4 种不同 COD 浓度废水 COD 去除率在好氧条件下分别为 96.7%、95.8%、92.6%、89.6%, 厌氧/好氧交替条件下分别为 94.5%、93.1%、89.3%、84.4%, 厌氧条件下分别为 79.8%、83.1%、74.3%、74.5%; 染料去除率在好氧条件下分别为 99.2%、98.5%、97.9%、96.4%, 厌氧/好氧交替条件下分别为 98.1%、97.3%、93.3%、88.9%, 厌氧条件下分别

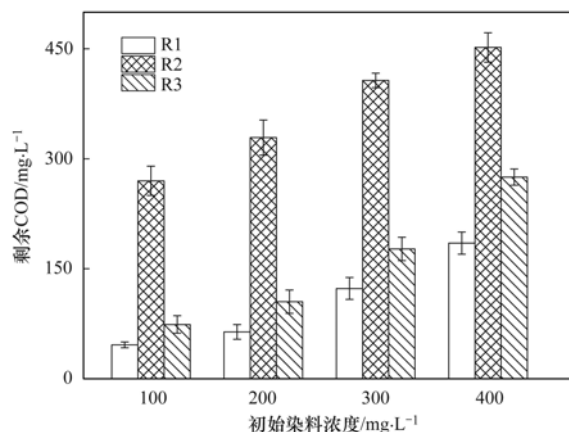


图 3 反应器对废水 COD 的去除

Fig. 3 COD removal performance of the reactors

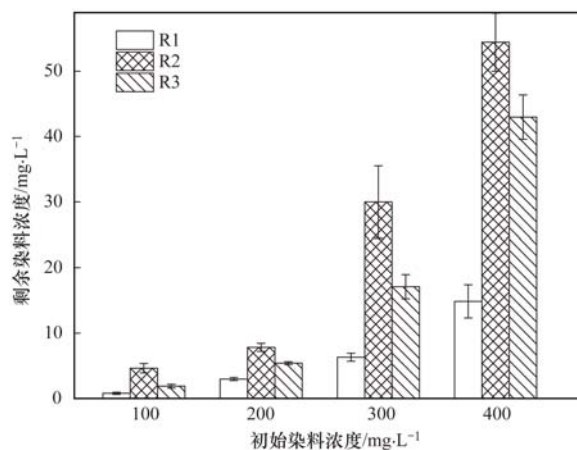


图 4 反应器对废水中染料的去除

Fig. 4 NB removal performance of the reactors

为 95.4%、96.1%、90.0%、79.3%. 由此可见, 不同 NB 染料配比浓度废水的 COD 和染料均是在好氧条件下降解效率最高, 厌氧/好氧交替条件次之, 厌氧条件下染料降解效率最低; 而在同一反应器中, 随着染料浓度的增加, 微生物对废水 COD 和染料的降解效率逐渐下降.

对于印染废水, 一般来说, 厌氧/好氧交替更应该有利于微生物对废水色度(染料)的去除, 厌氧环境有利于某些还原类酶的生成和作用, 而好氧曝气可以提供充足的电子受体和受氢体, 有利于将有机物彻底矿化分解^[17]. 本实验在好氧条件下反应器对 NB 染料的降解效率最高, 可能的原因有二, 其一是该分散染料的相对分子量较小, 容易进入细胞膜, 同时也没有增加生物降解难度的基团(如磺酸基、羧基等), 本身较易生物降解, 其二是在曝气池中存在大量厌氧微环境, 菌胶团内部处于厌氧状态, 微生物可以产生大量还原类酶. NB 染料结构上以苯环为主要架构, 含有偶氮双键和其它含氮基团, 代谢时

会产生大量苯胺类物质,这类物质对微生物具有强烈抑制作用,并在反应器中累积,而且随着染料浓度的增加,包括染料本身和其某些中间代谢产物在废水中累积也就越多,从而抑制了微生物活性^[18,19],并最终表现为反应器对 COD 和染料去除效率的下降;Hakimelahi 等^[20]利用微生物降解偶氮染料也获得类似实验结果。

2.2 不同曝气条件对 NB 染料降解的影响

图 5 为 NB 染料浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD 浓度为 $1771 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 废水在好氧、厌氧、厌氧/好氧这 3 种实验条件下 24 h 生物降解过程中 NB 染料的浓度变化情况。为便于分析,结合厌氧/好氧反应器的厌氧和好氧交替周期,把整个实验过程分为 4 个阶段,具体见图 5。

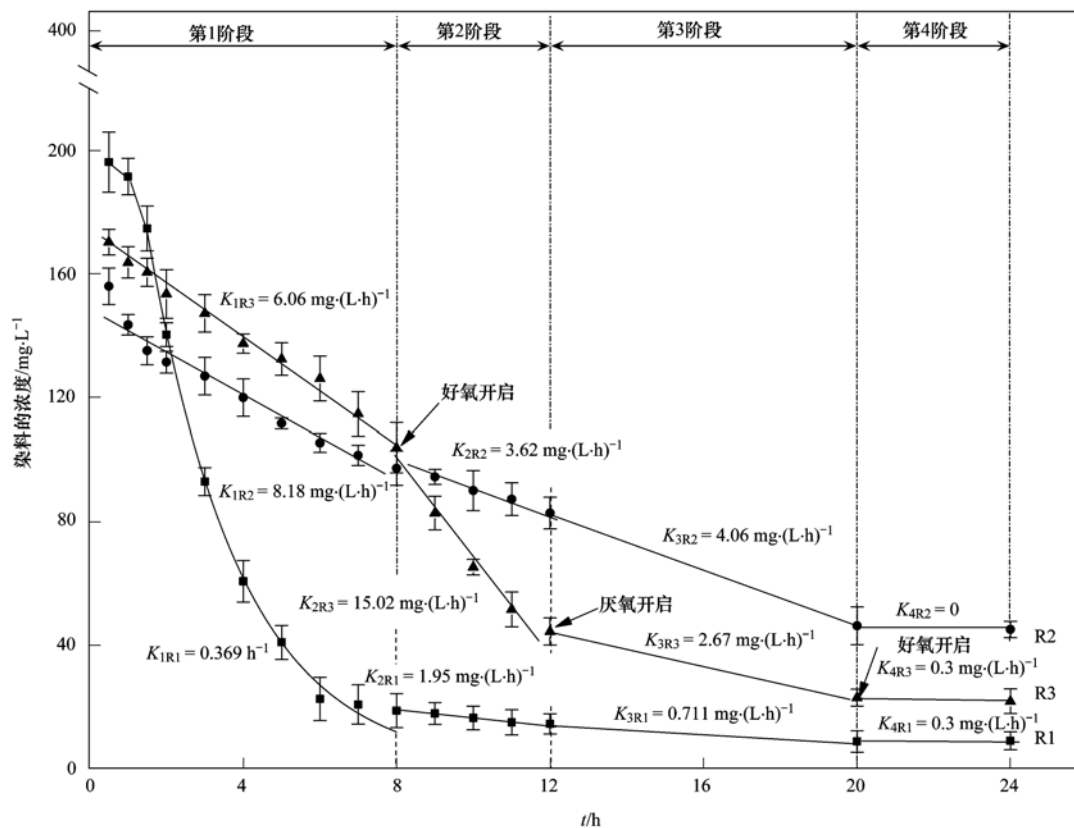


图 5 染料在好氧、厌氧、厌氧/好氧交替条件下的浓度变化对比

Fig. 5 Comparison of variation of NB concentration with time under aerobic, anaerobic and alternating anaerobic/aerobic conditions

由图 5 可见,在染料和污泥混合后的一段时间内,污泥的生物吸附作用依然明显,在生物吸附和生物降解共同作用下,在前 1.5 h 内(即第一阶段的前 1.5 h)NB 染料由实验开始时候的 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 迅速降低,在该时间段好氧条件下 NB 染料去除率最低,厌氧/好氧条件次之(实际处于厌氧状态),厌氧条件下最高;在 1.5 ~ 8 h 之间(依然属于第一阶段;可以认为从该阶段开始,染料浓度的降低是通过生物降解作用实现的),NB 染料在好氧条件下降解速率最高(好氧条件下反应器对染料降解符合一级反应动力学,速率常数 $K_{1R1} = 0.369 \text{ h}^{-1}$, $R^2 = 0.968$),厌氧/好氧交替次之[厌氧/好氧交替反应器在该时段实际处于厌氧状态,微生物对染料降解符合零级反应动力学,速率常数 $K_{1R2} = 8.18 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, $R^2 = 0.989$],厌氧反应器最低[厌氧反应器对染料降解

符合零级反应动力学,速率常数 $K_{1R3} = 6.06 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, $R^2 = 0.990$]. 在 8 ~ 12 h 之间(即第二阶段),厌氧/好氧交替反应器开始曝气,该反应器中 NB 染料降解率最高,厌氧反应器次之,好氧反应器最低[在此阶段,3 种反应器对染料降解均符合零级反应动力学,速率常数分别为 $K_{2R3} = 15.02 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, $R^2 = 0.969$; $K_{2R2} = 3.62 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, $R^2 = 0.993$; $K_{2R1} = 1.15 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, $R^2 = 0.979$]. 在 12 ~ 20 h 阶段(即第三阶段),厌氧和好氧条件下 NB 染料降解速率变化不大,而厌氧/好氧交替反应器重新进入到厌氧状态,染料降解速率下降明显. 在 20 ~ 24 h 阶段(即第四阶段),3 种反应器中染料的降解速率均较前一阶段降低,染料的生物降解作用基本停滞。

在染料降解的前 1.5 h 时段,反应器在厌氧条

件下(厌氧/好氧交替反应器也是处于厌氧状态)对染料去除效果优于好氧条件,厌氧条件产生的还原类酶在染料前期降解过程中起到关键作用. 在前 8 h 时段中,厌氧/好氧交替条件实际处于厌氧状态,之所以出现该条件下对染料去除效率高于厌氧条件时的现象. 可能的原因有二: 其一是厌氧/好氧交替系统始于前一组实验的好氧处理,虽然本组实验开始前 3 组反应器污泥均经过清水洗涤和一天的静置,但是总体上经过好氧曝气后的污泥中残留染料要少于厌氧系统,因此厌氧/好氧交替系统在厌氧阶段的染料浓度比厌氧反应器中更低; 其二是经过厌氧/好氧交替作用的微生物处于更低浓度的基质中,对新加入代谢基质也表现出更强代谢能力. 进入第三阶段以后,随着系统内易生物降解物质的逐渐消耗和难生物降解物质的大量累积,微生物代谢速度随之降低,在第四阶段甚至出现停滞. 总体来讲,厌氧生物处理对于 NB 染料的降解至关重要,而好氧条件也加速了后续生物降解速度. 有研究发现,某些微生物在好氧条件下能使偶氮键断裂^[21,22],同时染料偶氮键断裂生成的芳香胺在好氧

条件下更易降解^[23,24],这些因素均会对 NB 染料的生物降解过程具有促进作用.

2.3 外加碳源对 NB 染料降解速率的影响

图 6 为染料浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 废水,在 R1、R2、R3 反应器中,分别在有外加碳源(按照表 1 中的营养配比,废水 COD 为 $1529 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和无外加碳源条件下(仅有 NB 染料作为碳源)12h 生物降解过程中染料浓度变化情况对比,其中 R1 好氧 12h、R2 厌氧 12h、R3 厌氧 8 h + 好氧 4 h.

从图 6 可以看出,在好氧、厌氧、厌氧/好氧条件下,在 12 h 的染料降解过程中,有外加碳源时 NB 染料去除率均高于无外加碳源时的去除率,有外加碳源时 R1 中 12 h 脱色率为 98.5%,无外加碳源时 92.3%; 有外加碳源时 R2 中 12 h 脱色率为 96.1%,无外加碳源时 81.0%; 有外加碳源时 R3 中 12 h 脱色率为 97.3%,无外加碳源时 88.5%. 根据图 6 中不同时间点对应的染料浓度分析,有外加碳源条件下,在 2 h 以后微生物对染料降解符合零级反应动力学,R1、R2、R3 反应器对 NB 染料降解动力学速率常数分别为 0.458、0.820 和 0.784

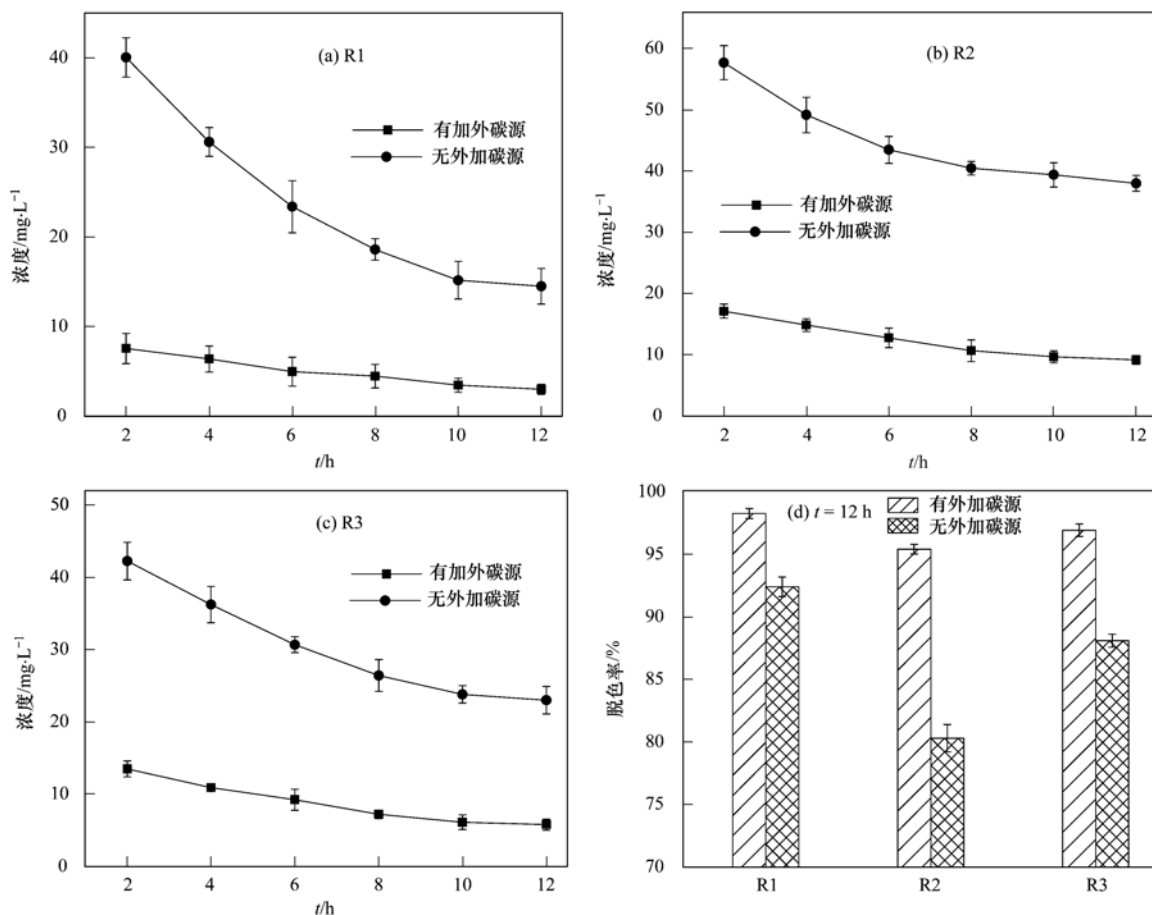


图 6 外加碳源对 NB 染料降解的影响

Fig. 6 Effect of external carbon source on NB bio-degradation

$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ (R^2 分别为 0.971、0.954、0.948), 在无外加碳源条件下, 在 2 h 以后微生物对染料降解符合一级反应动力学, R1、R2、R3 反应器的动力学速率常数分别为 0.105、0.040 和 0.063 h^{-1} (R^2 分别为 0.967、0.900、0.966). 外加葡萄糖对 NB 染料的生物降解具有促进作用, 并改变了该染料生物降解的动力学特征, 易生物降解物质在偶氮染料降解过程中为微生物代谢提供了优质的代谢基质, 微生物处于良好能量状态, 通过共代谢作用加速了染料降解进程.

对比有外加葡萄糖条件下 2 h 后染料降解动力学参数, 染料降解速率常数在好氧条件下最低, 在厌氧条件下反而最高, 这似乎与前面的实验结果相矛盾; 实际上, 在有外加碳源条件下 2 h 时染料的大部分已经实现了初步生物降解, 而且好氧条件下的降解效率最高, 厌氧/好氧交替条件次之, 厌氧条件下最低, 2 h 以后的生物降解过程更接近在反应器中有大量中间代谢产物积累、而外加碳源基本逐渐代谢完毕时的情况 (特别是好氧条件下). 与图 5 中 NB 染料起始浓度为 400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条

件下的降解动力学参数相比较 (有外加碳源), 不同起始浓度染料的生物降解动力学特性和动力学参数也存在较大差别, 染料生物降解过程是个复杂的系列反应, 特别是随着对微生物具有强烈抑制作用中间代谢产物的逐渐生成和积累, 仅仅体现染料发色基团受到破坏的染料降解动力学特性受到诸如中间代谢产物浓度、剩余外加碳源等诸多因素影响.

总体上讲, 在实验的 12 h 内, 不同曝气条下有外加碳源时 NB 染料降解情况和无外加碳源时类似, 均是厌氧条件降解速率最小, 厌氧/好氧条件次之, 好氧条件最大. 由此可见, 外加碳源通过共代谢作用改善了 NB 染料的生物降解性能, 但是如 2.1 节所论述的原因, 相对分子质量较小的 NB 染料在外加碳源条件下, 依然是在有氧条件下生物降解速率最大.

2.4 NB 染料降解生物降解过程分析

NB 染料浓度为 400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在有外加碳源条件下, 染料在 R1、R2、R3 反应器中 24 h 生物降解过程全波段紫外光谱如图 7 所示.

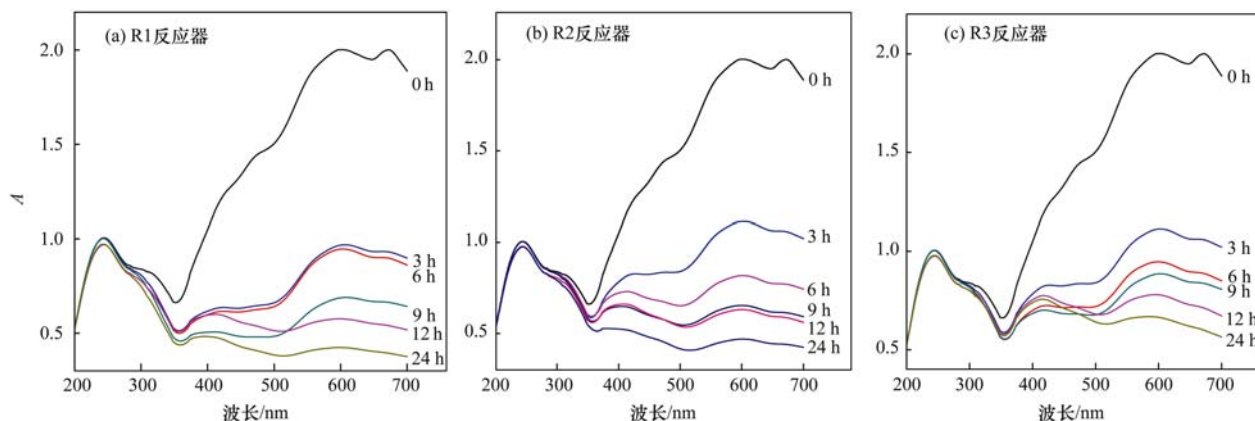


图 7 染料降解过程全波段光谱图

Fig. 7 Absorbance spectra in effluents during the degradation process

分散染料 NB 呈蓝黑色, 其最大吸收波长在 600 nm 左右. 由图 7 可见, 在染料色生物降解过程中, 在 200 ~ 350 nm 区间, 3 个反应器的波谱形状类似、波谱面积相近, 苯环、不饱和烃和共轭烯烃在 250 nm 左右均存在较强特征峰, 推测在 244 nm 左右处出现波峰的物质包含上述几种物质, 这类物质在实验过程中波谱形状和大小没有较大变化, 意味实验条件下此类物质始终未得到充分降解; 联系反应器对废水 COD 的降解效率, 经过 24 h 的生物降解, 废水中的大部分污染物逐渐被去除, 紫外光谱中体现出的此类污染物保持较稳定的浓度, 可能是此类污

染物在实验条件下的平衡浓度. 在可见光区域 (400 ~ 700 nm), 3 个反应器中波谱形状相似, 而且随着生物降解时间的延长, 染料最大吸收波长处的波峰均明显降低, 染料偶氮双键发色基团得到了充分降解, NB 染料获得了较高的生物降解效率; 比较而言, 经过 24 h 生物降解, R1 反应器中染料降解率最高, R2 反应器次之, R3 反应器最低. 再比较 3 h 和 6 h 的波谱, 好氧条件下偶氮双键的降解效率最低, 远低于厌氧条件下的降解速度 (厌氧/好氧交替此时也是处于厌氧状态), 说明了厌氧环境对于偶氮染料生物降解的重要作用.

2.5 染料降解中间产物分析

对 NB 染料生物降解过程的产物进行 GC-MS 分析,根据 GC-MS 实验结果和相关报道^[25~28],推测 NB 染料可能的一种生物降解路径。

图 8 显示了 NB 分子一种可能的生物降解路径。由于 NB 染料是一种结构简单、单偶氮键的偶氮染料,其易被生物降解、且降解路径相对较简单。

首先 NB 染料中偶氮键在偶氮还原酶的催化作用下断裂生成(S1) 2,4-二硝基苯胺和(S6) 2-氰基-4-硝基苯胺两种芳香胺化合物,根据 GC-MS 测得数据分析,这两种苯胺类物质在微生物进一步的作用下继续降解。在 S1 的降解路径中,首先 S1 通过还原反应生成 S2(4-甲氧基-2-硝基苯胺),然后 S2 通过脱氨基作用生成 S3(3-硝基苯甲醚),而 S3 又通过水

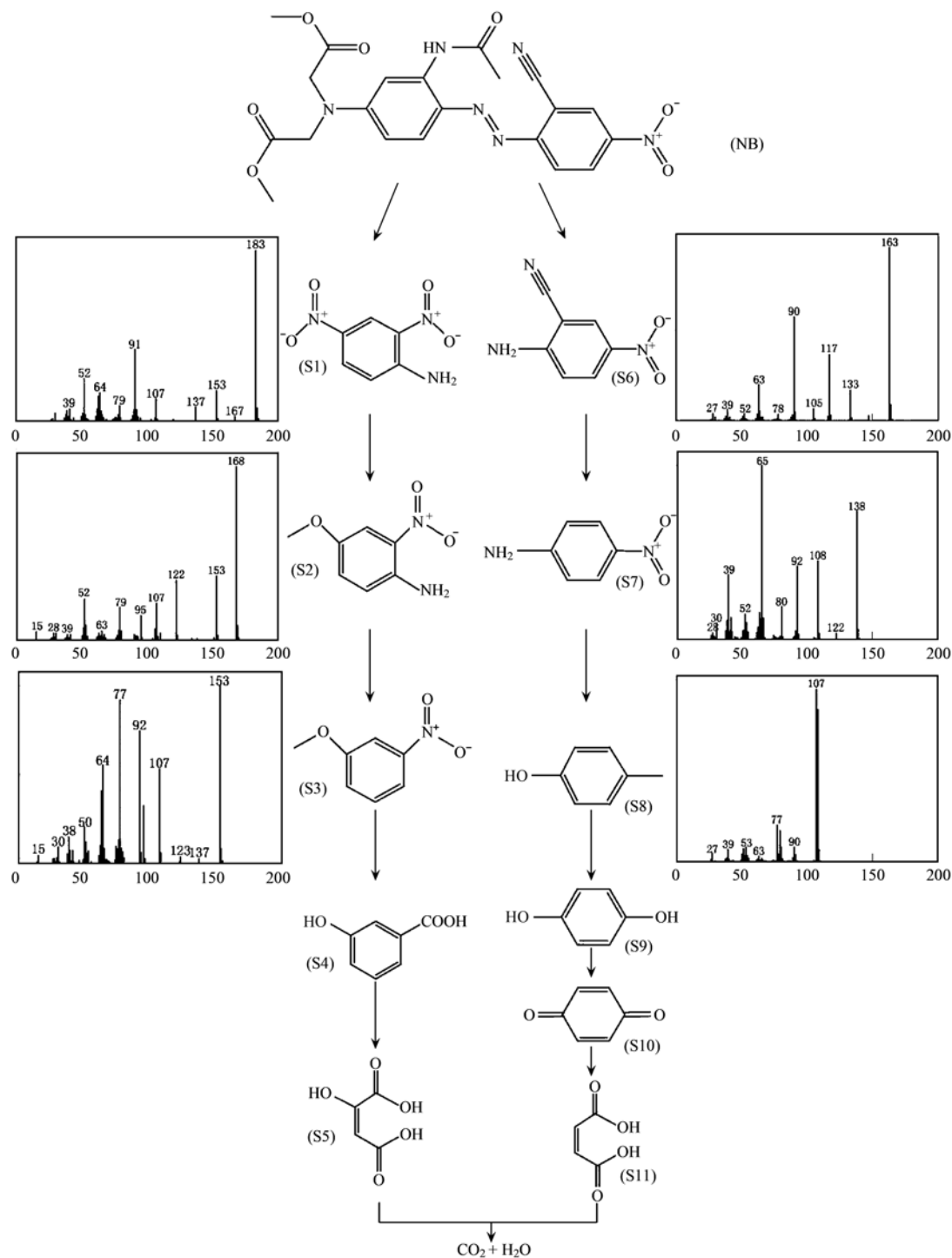


图 8 染料可能的生物降解路径

Fig. 8 Probable dye bio-degradation pathway of NB

解和取代反应生成更加稳定的中间代谢产物 S4(3-羟基苯甲酸), S4 在微生物的作用下苯环解环生成不饱和脂肪酸 S5(顺-2-羟基-1,4-丁烯二酸), 最终 S5 被完全降解生成 CO_2 和 H_2O , 实现染料的完全降解; 同样地, S6 也有类似的降解路径. S6 通过脱氨基反应生成 S7(对硝基苯胺), 后 S7 通过水解反应脱去氨基和硝基生成 S8(4-甲基苯酚), 而又根据文献[29,30]的研究结果, 推测 S8 生成 S9(对羟基苯酚), S9 通过氧化反应生成 S10(对羰基环己二烯), 后 S10 通过苯环解环生成不饱和脂肪酸 S11(1,4-丁烯二酸), 最终 S11 被完全降解生成 CO_2 和 H_2O , 同样实现染料的完全降解.

3 结论

(1) NB 染料的生物降解效率, 好氧条件下最高, 厌氧/好氧交替条件次之, 厌氧条件下染料降解效率最低; 在同一反应器中, 随着染料浓度的增加, 微生物对 NB 染料的降解效率逐渐下降. 厌氧条件对于 NB 染料的降解至关重要, 而好氧条件加速了染料代谢产物的生物降解进程.

(2) 染料生物降解的动力学特性受到曝气形式、染料浓度和外加碳源的影响, 外加碳源对 NB 染料的生物降解具有促进作用. 在染料浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、有外加碳源条件下, 2 h 后微生物对染料降解为零级反应, 在无外加碳源条件下, 2 h 后微生物对染料降解为一级反应.

(3) 不同实验条件下, NB 染料偶氮双键发色基团均得到充分降解, 但是在反应器中始终有苯环、不饱和烃和共轭烯烃等未得到充分降解. NB 偶氮染料生物降解先从偶氮双键断裂, 之后生成芳香胺, 芳香胺再通过一系列生物降解作用, 最终开环直至被完全生物降解.

参考文献:

- [1] Chequer F M D, Lizier T M, De Felício R, *et al.* The azo dye Disperse Red 13 and its oxidation and reduction products showed mutagenic potential[J]. *Toxicology in Vitro*, 2015, **29**(7): 1906-1915.
- [2] Chengalroyen M D, Dabbs E R. The microbial degradation of azo dyes: minireview[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, **29**(3): 389-399.
- [3] Waghmode T R, Kurade M B, Kabra A N, *et al.* Biodegradation of Rubine GFL by *Galactomyces geotrichum* MTCC 1360 and subsequent toxicological analysis by using cytotoxicity, genotoxicity and oxidative stress studies[J]. *Microbiology*, 2012, **158**(9): 2344-2352.
- [4] Debnath S, Ballav N, Nyoni H, *et al.* Optimization and mechanism elucidation of the catalytic photo-degradation of the dyes Eosin Yellow (EY) and Naphthol blue black (NBB) by a polyaniline-coated titanium dioxide nanocomposite[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, **163**: 330-342.
- [5] Noël I M, Lebrun R, Bouchard C R. Electro-nanofiltration of a textile direct dye solution[J]. *Desalination*, 2000, **129**(2): 125-136.
- [6] Kurade M B, Waghmode T R, Kabra A N, *et al.* Degradation of a xenobiotic textile dye, Disperse Brown 118, by *Brevibacillus laterosporus*[J]. *Biotechnology Letters*, 2013, **35**(10): 1593-1598.
- [7] 李欢旋, 万金泉, 马邕文, 等. 不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙 7 的影响及动力学研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3422-3429.
- Li H X, Wan J Q, Ma Y W, *et al.* Effects of particle size of zero-valent iron on the reactivity of activating persulfate and kinetics for the degradation of acid orange 7[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3422-3429.
- [8] 魏红, 李克斌, 李娟, 等. 直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2271-2276.
- Wei H, Li K B, Li J, *et al.* Photocatalytic reductive degradation of direct red 4BE by phosphotungstic acid[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2271-2276.
- [9] Dos Santos A B, Cervantes F J, van Lier J B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology[J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(12): 2369-2385.
- [10] Yaşar S, Çirik K, Çinar Ö. The effect of cyclic anaerobic-aerobic conditions on biodegradation of azo dyes[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2012, **35**(3): 449-457.
- [11] Jonstrup M, Kumar N, Murto M, *et al.* Sequential anaerobic-aerobic treatment of azo dyes: Decolourisation and amine degradability[J]. *Desalination*, 2011, **280**(1-3): 339-346.
- [12] Shaw C B, Carliell C M, Wheatley A D. Anaerobic/aerobic treatment of coloured textile effluents using sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 2002, **36**(8): 1993-2001.
- [13] Khuntia S, Majumder S K, Ghosh P, *et al.* A pilot plant study of the degradation of Brilliant Green dye using ozone microbubbles: mechanism and kinetics of reaction[J]. *Environmental Technology*, 2015, **36**(3): 336-347.
- [14] Liu S T, Song H L, Wei S Z, *et al.* Effect of direct electrical stimulation on decolorization and degradation of azo dye reactive brilliant red X-3B in biofilm-electrode reactors[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, **93**: 294-302.
- [15] 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. 121-124.
- [16] Koupaie E H, Moghaddam M R A, Hashemi S H. Post-treatment of anaerobically degraded azo dye Acid Red 18 using aerobic moving bed biofilm process: enhanced removal of aromatic amines[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 147-154.
- [17] van der Zee F P, Villaverde S. Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes—a short review of bioreactor studies[J]. *Water Research*, 2005, **39**(8): 1425-1440.
- [18] 全燮, 杨凤林, 李和平. 几种偶氮染料生物降解性研究[J]. *环境科学*, 1991, **12**(3): 27-30.
- Quan X, Yang F L, Li H P. Study on biodegradability of some sorts of azo-dyestuffs[J]. *Environmental Science*, 1991, **12**(3): 27-30.

- [19] Przysaś W, Zabłocka-Godlewska E, Grabińska-Sota E. Biological removal of azo and triphenylmethane dyes and toxicity of process by-products[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, **223**(4): 1581-1592.
- [20] Hakimelahi M, Moghaddam M R A, Hashemi S H. Biological treatment of wastewater containing an azo dye using mixed culture in alternating anaerobic/aerobic sequencing batch reactors[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2012, **17**(4): 875-880.
- [21] Stolz A. Basic and applied aspects in the microbial degradation of azo dyes[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, **56**(1-2): 69-80.
- [22] Tony B D, Goyal D, Khanna S. Decolorization of textile azo dyes by aerobic bacterial consortium[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2009, **63**(4): 462-469.
- [23] Popli S, Patel U D. Destruction of azo dyes by anaerobic-aerobic sequential biological treatment: a review [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, **12**(1): 405-420.
- [24] Mohan S V, Babu P S, Naresh K, *et al.* Acid azo dye remediation in anoxic-aerobic-anoxic microenvironment under periodic discontinuous batch operation: bio-electro kinetics and microbial inventory [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **119**: 362-372.
- [25] Velmurugan R, Swaminathan M. A study of mechanism and operational parameters on solar light-induced degradation of Reactive Red 120 dye with AgBr-loaded TiO₂ [J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2015, **41**(2): 1227-1241.
- [26] Wu F, Deng N S, Hua H L. Degradation mechanism of azo dye C. I. reactive red 2 by iron powder reduction and photooxidation in aqueous solutions[J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(8): 1233-1238.
- [27] Olya M E, Pirkarami A, Soleimani M, *et al.* Photoelectrocatalytic degradation of acid dye using Ni-TiO₂ with the energy supplied by solar cell: mechanism and economical studies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **121**: 210-219.
- [28] Pereira R, Pereira L, van der Zee F P, *et al.* Fate of aniline and sulfanilic acid in *UASB* bioreactors under denitrifying conditions [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 191-200.
- [29] Harichandran G, Prasad S. SonoFenton degradation of an azo dye, Direct Red [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, **29**: 178-185.
- [30] Zhao H Z, Sun Y, Xu L N, *et al.* Removal of Acid Orange 7 in simulated wastewater using a three-dimensional electrode reactor: removal mechanisms and dye degradation pathway [J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(1): 46-51.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)