

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制

文刚¹, 朱红¹, 黄廷林^{1*}, 赵建超^{1,2}, 任崑¹, 徐向前¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国市政工程中南市政设计研究院, 武汉 430010)

摘要: 地下水源中真菌大量繁殖会产生臭味, 引发毒性反应以及产生大量肉眼可见的絮状物, 严重影响供水水质。以地下水源中 3 种优势真菌木霉属、青霉属、枝孢属为研究对象, 以氯为消毒剂, 通过研究真菌孢子胞内物质泄漏, 胞外三磷酸腺苷 (ATP), 脱氧核糖核酸 (DNA) 和蛋白质增加及孢子形态变化, 探明了氯灭活 3 种真菌孢子的效能与机制。结果表明, 氯灭活真菌孢子符合一级动力学, 满足 Chick 模型, 3 种真菌的耐氯性为: 木霉属 > 青霉属 > 枝孢属, 真菌孢子尺寸越大, 亲水性越强, 灭活效果越好。氯灭活后, 胞内物质泄漏, 胞外特征物质 (ATP、DNA、蛋白质) 显著增加; 氯对细胞表面破坏严重, 灭活后真菌孢子凹陷, 表面褶皱。综上所述, 氯首先作用于孢子表面, 降低孢子的可培养性, 进一步作用使细胞的通透性屏障受损, 导致胞内特征物质释放, 以致孢子死亡。

关键词: 氯; 真菌孢子; 灭活机制; 胞内物质; 疏水性

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4228-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605191

Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine

WEN Gang¹, ZHU Hong¹, HUANG Ting-lin^{1*}, ZHAO Jian-chao^{1,2}, REN Wei¹, XU Xiang-qian¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Central and Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The outbreak of fungi in drinking groundwater sources can produce odor, cause toxicity and form lots of visible flocs, which seriously affect the drinking water quality. In this study, the inactivation efficiency of three dominant fungal spores *Trichoderma*, *Penicillium*, *Cladosporium* by chlorine was conducted, and the inactivation mechanism was explored by monitoring the hydrophobicity, the leakage of intracellular substances, the increase of extracellular adenosine triphosphate (ATP), deoxyribonucleic acid (DNA) and proteins, and the change of spores' morphology. The results showed that the inactivation of fungal spores was consistent with first-order kinetics and satisfied the Chick model. The resistance to chlorine was in sequence of *Trichoderma* > *Penicillium* > *Cladosporium*, the larger size the fungal spores and the more hydrophilicity the fungal spores, the higher the inactivation efficiency. Chlorination resulted in the remarkable leakage of intracellular compounds, the increase of extracellular characteristic compounds (ATP, DNA and protein), the damage of the cell surface, and the fungal spores recessed and wrinkled. In summary, chlorine firstly reacted with spores' surface and reduced their cultivability, and then resulted in the damage to the permeability barrier of the spores and the release of intracellular characteristic compounds, and finally the viability of spores was damaged.

Key words: chlorine; fungal spores; inactivation mechanism; intracellular substance; hydrophobicity

饮用水中真菌导致的臭味问题^[1,2]和真菌的致病性^[3~5]引起了世界范围内对真菌问题的关注。20 世纪 90 年代, 在芬兰和瑞典的自来水中暴发了臭味问题, 并发现真菌是导致水中臭味(2,4,6-三氯苯甲醚)的主要原因^[3,6], Aslund^[7]报道在瑞典 Rabacka 市暴发了大量的皮肤感染, 这主要是由于自来水中真菌含量高达 77 ~ 3 100 CFU·(100 mL)⁻¹, 引发这种感染的真菌是瓶霉。另外, Hageskal 等^[8]发现在挪威的自来水中存在一种绿色木霉能引发哮喘。

氯用于饮用水消毒已有近百年历史, 仍是主流消毒方法。氯起消毒作用的是氯与水反应生成的次氯酸, 反应式如下:



次氯酸是很小的中性分子, 它可以自由扩散到带负电的细胞表面, 并穿透细胞壁到达细胞内部进行氧化作用, 一旦细胞内部的酶系统被破坏, 细胞很快死亡^[9]。此外, 次氯酸性质不稳定, 易释放具有极强氧化性的新生态氧, 使得细胞膜表面蛋白质变性, 细胞屏障被破坏, 从而致死微生物^[10]。

Pereira 等^[11]报道了氯对枝孢霉、茎点霉、曲霉和青霉等共 7 种霉菌的灭活效果, 并考察了消毒剂

收稿日期: 2016-05-25; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308438, 51678472); 陕西省青年科技新星项目(2016KJXX-65); 中国博士后科学基金项目(2015M580821, 2016T90896)

作者简介: 文刚(1983~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为饮用水生物安全性及消毒控制, E-mail: hitwengang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

浓度、温度和 pH 对消毒过程的影响, 研究发现霉菌比普通细菌更加抗氯, 达到 80% 失活效果需要的 Ct 值为 $60 \text{ min} \cdot \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 近年来关于饮用水中真菌灭活的研究逐渐增多, 但大多数研究停留在宏观效果研究阶段, 微观机制研究较少.

本文以地下水中 3 种优势真菌木霉属、青霉菌属、枝孢属为研究对象, 对氯灭活 3 种真菌孢子的差异性进行了分析, 通过解析真菌孢子疏水性、胞内物质泄漏、胞外三磷酸腺苷 (ATP)、脱氧核糖核酸 (DNA) 和蛋白质增加及孢子形态变化对氯灭活真菌孢子的微观机制进行了探讨.

1 材料与方法

1.1 真菌孢子悬液与大肠杆菌菌液制备

将存于斜面的真菌接种至氯硝铵孟加拉红琼脂培养基 (DRBC) 上^[12], 培养成熟后 (5 ~ 7 d), 用无菌磷酸盐缓冲液 (PBS) 将菌落表面孢子与部分菌丝洗脱. 随后将孢子悬液在 10°C , 50 kHz 超声 10 min (KQ-500DE, 昆山市超声仪器有限公司, 中国) 使得真菌孢子分散, 然后用 PBS 溶液清洗 3 次 ($3600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 离心 10 min)^[13], 在光学显微镜 (BX51, Olympus, 日本) 下用血球计数板计数孢子^[11], 将孢子悬液控制在 $10^6 \sim 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, 待用.

将大肠杆菌斜面菌种 (ATCC25922) 接种至 100 mL 营养肉汤培养基, 37°C , $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床培养 24 h, 随后 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 弃去上清液, 用 PBS 冲洗 2 次, 得到菌悬液^[14]. 用 PBS 稀释大肠杆菌浓度为 $10^6 \sim 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, 待用.

1.2 氯灭活 3 种真菌孢子与大肠杆菌

将孢子悬液 ($10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$) 1 mL 加入到盛有 99 mL PBS 的锥形瓶中, 加入消毒剂使其初始浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 置于恒温振荡培养箱中 ($T = 25^\circ\text{C}$, $n = 120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 在预定反应时间取出 1 mL 水样加入到 9 mL 带有终止剂 ($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 的无菌生理盐水中, 取 100 μL 涂布于 DRBC 培养基上, 25°C 恒温培养箱中避光培养 7 d 后计数^[15].

大肠杆菌悬液灭活方法同上, 营养琼脂培养基 37°C 避光培养 1 d 后计数.

1.3 孢子灭活机制研究

1.3.1 疏水性测定

本实验采用微生物粘着碳烃化合物法测定细胞表面疏水性^[16, 17]. 向 10 mL 磨口圆底玻璃比色管 ($d = 10 \text{ mm}$, 实验前用盐酸浸泡, 用超纯水洗净, 高压锅 121°C 灭菌 15 min) 内加入 4 mL 孢子悬液 (约

$10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$), 再加入 1.5 mL 正己烷作为有机相. 用玻璃塞封口, 室温下剧烈振荡 60 s, 静置 15 min 分层. 用无菌注射针头快速吸取水相溶液 3 mL, 以 PBS 为空白对照, 在 750 nm 波长下测定吸光度值. 每个样品重复测定 3 次. 同时以不加有机相作为对照组.

细胞表面疏水率:

$$\text{CSH} = \frac{(\text{对照组 } A_{750 \text{ nm}} - \text{实验组 } A_{750 \text{ nm}})}{\text{对照组 } A_{750 \text{ nm}}} \times 100\% \quad (4)$$

1.3.2 胞内物质泄漏

将真菌孢子悬液 ($10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$) 加入到 20 mL 试管中, 加氯使初始浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 作用 30 min, 使用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 终止反应后取出 10 mL 菌液离心 ($10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 15 min), 测定孢子液及其上清液总氮的浓度. 同时测定未加氯孢子液及其上清液的总氮浓度. 上清液中总氮代表胞外总氮, 孢子液总氮减去上清液总氮即为胞内总氮. 总氮采用碱式过硫酸钾法测定^[18].

1.3.3 三磷酸腺苷 (ATP)、脱氧核糖核酸 (DNA) 与蛋白质

(1) ATP 测定

ATP 测定采用 BacTiter-Glo 试剂 (G8231, Promega, 美国), 检测仪器为生物化学发光仪 (Glomax-20/20, Promega Biosystems, 美国), 将样品在 38°C 金属浴中预热 10 min, ATP 试剂预热 2 min, 然后将 500 μL 样品与 50 μL ATP 试剂混合, 20 s 后测定化学发光强度 (RLU), 结果为总 ATP 含量. 将孢子悬浮液通过 0.1 μm 滤膜过滤测得结果为胞外 ATP 含量. 总 ATP 减去胞外 ATP 即为胞内 ATP 含量^[19].

(2) DNA 与蛋白质的测定

孢子悬液离心 ($10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 15 min), 取上清液 0.1 μL 使用微量分光光度计 (ND-2000, NanoDrop, 美国) 在波长 260 nm 与 280 nm 处测定. 其中 DNA 浓度由仪器直接测定, 蛋白质浓度根据公式 (5) 计算:

$$\text{蛋白质浓度} (\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}) = 1.45A_{280} - 0.74A_{260} \quad (5)$$

1.3.4 扫描电镜 (SEM)

取孢子悬液 ($10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$) 进行离心 ($10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 15 min), 弃上清液, 沿管壁缓慢加入 20 倍体积的 3% 的戊二醛, 4°C 静置固定过夜^[20]. 依次使用 PBS 和不同浓度酒精 (20% ~ 100%) 进行漂洗, 以洗

去多余的固定液,最后加入乙酸异戊酯,自然干燥后待用.将带有真菌孢子的管壁切开,粘在导电胶上,喷金后使用扫描电镜(JSM-6510,JEOL,日本)拍照.

1.4 灭活效果评价

1.4.1 灭活率

氯灭活真菌孢子的效果依据灭活不同时间水样中真菌的灭活率 S 进行判断,计算公式如下:

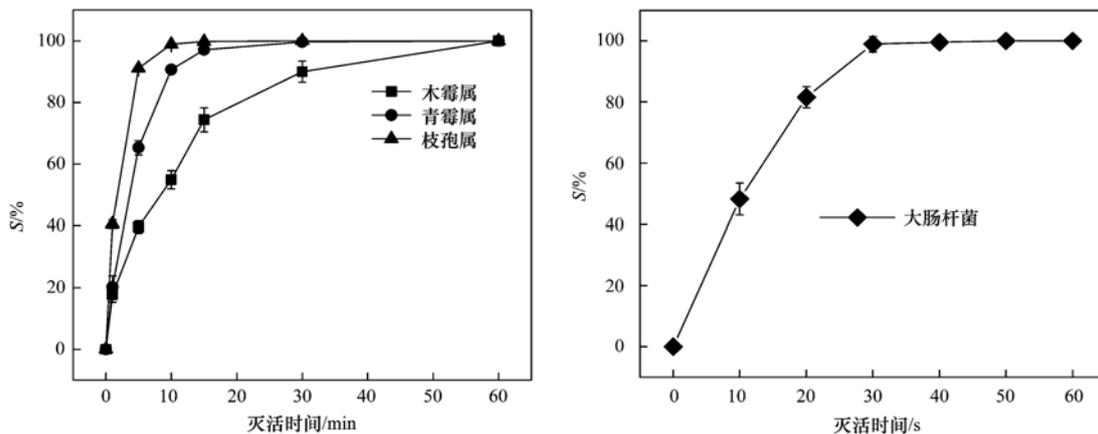
$$S = (N_0 - N_t) / N_0 \quad (6)$$

式中, N_t 为实验 t 时真菌菌落数 [$\text{CFU} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$]; N_0 为实验初始真菌菌落数 [$\text{CFU} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$]; S 为真菌灭活率(%).

1.4.2 动力学模型

Chick 模型用一级动力学反应来表达微生物的灭活速率^[21]:

$$N_t = N_0 e^{-kCt} \quad (7)$$



pH = 7, $T = 25^\circ\text{C}$

图 1 氯灭活 3 种真菌及大肠杆菌的效果

Fig. 1 Inactivation of three species of fungal spores and *E. coli* by chlorine

氯灭活真菌孢子符合一级动力学,由 Chick 模型计算所得速率常数见表 1,相关系数均大于 0.90,其计算结果与灭活结果一致,真菌灭活速率常数顺序为:枝孢属 (0.079 min^{-1}) > 青霉属 (0.045 min^{-1}) > 木霉属 (0.037 min^{-1}),大肠杆菌的灭活速率远大于 3 种真菌孢子.

Pereira 等^[11]研究指出真菌比细菌和病毒表现出更高的耐氯性.灭活几种真菌所需 $Ct_{99\%}$ 值为 $71 \sim 1404 \text{ min} \cdot \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (25°C , $\text{pH} = 7$, $C = 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而灭活大肠杆菌仅需 $0.04 \text{ min} \cdot \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (5°C , $\text{pH} = 6$)或 $0.6 \text{ min} \cdot \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (23°C , $\text{pH} = 10$).

真菌较大肠杆菌难以灭活有两个方面的原因:一方面,细胞组成不同.首先,真菌具有被核膜包裹的完整细胞核,这增加了氯进入细胞后破坏真菌遗传物质的难度;其次,细菌细胞壁的主要成分是肽

式中, N_t 为实验 t 时真菌菌落数 [$\text{CFU} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$]; N_0 为实验初始真菌菌落数 [$\text{CFU} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$]; k 为速率常数 (min^{-1}); C 为消毒剂浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为接触时间(s).

2 结果与讨论

2.1 氯灭活 3 种真菌的效能

氯灭活作用主要表现在次氯酸的强氧化作用^[22, 23].由图 1 可知,在氯初始浓度 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随着反应时间的延长,真菌的灭活率均呈现升高的趋势.在相同条件下,氯灭活 3 种真菌孢子效果存在差异,木霉全部灭活需要 60 min,较难灭活,青霉其次,枝孢最易灭活,三者耐氯性为:木霉属 > 青霉属 > 枝孢属.值得注意的是大肠杆菌在 30 s 时几乎全部灭活,由此可见真菌耐氯性远远强于细菌.

聚糖,而真菌是几丁质,几丁质对真菌细胞具有保护功能^[24],使其耐氯性更强;最后,两者细胞器组成不同,细菌只有核糖体一种细胞器,而真菌除核糖体外,还有内质网、高尔基体等多种细胞器,真菌较大肠杆菌细胞结构复杂的多,故其耐氯性也更高.

另一方面,细胞尺寸不同.大肠杆菌大小一般为 $1 \sim 3 \mu\text{m}$,而真菌一般大小为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$,真菌体积是大肠杆菌的数倍,灭活时需氯量更大.

表 1 氯灭活速率方程

微生物种类	速率方程	R^2	拟合时间范围
木霉属	$N_t = N_0 e^{-0.037Ct}$	0.94	0 ~ 30 min
青霉属	$N_t = N_0 e^{-0.045Ct}$	0.98	0 ~ 30 min
枝孢属	$N_t = N_0 e^{-0.079Ct}$	0.97	0 ~ 30 min
大肠杆菌	$N_t = N_0 e^{-0.286Ct}$	0.92	0 ~ 40 s

2.2 氯灭活后胞内含氮有机物泄漏

细胞中含氮有机大分子包括蛋白质和核酸等, 细胞膜受到破坏后会造成细胞内含氮有机物的流失, 此项指标可表征细胞的破坏程度及内部分子的外泄程度. 图 2 为灭活前后真菌孢子悬液胞内外总氮的变化, 经过 30 min 灭活后, 胞外含氮有机物浓度均呈现大幅上升的趋势, 说明氯对真菌孢子细胞膜产生了氧化破坏作用, 从而造成了细胞内含氮有机物的泄漏. 灭活 30 min 后, 枝孢属上清液总氮增加最大, 青霉属次之, 木霉属变化最小. 其原因一方面是由于枝孢属孢子体积较大, 胞内含氮有机物的量也较大, 另一方面是因为枝孢细胞破坏程度最大 (100% 灭活), 而木霉属经过 30 min 灭活后, 仍有 12% 的可培养未被灭活的孢子.

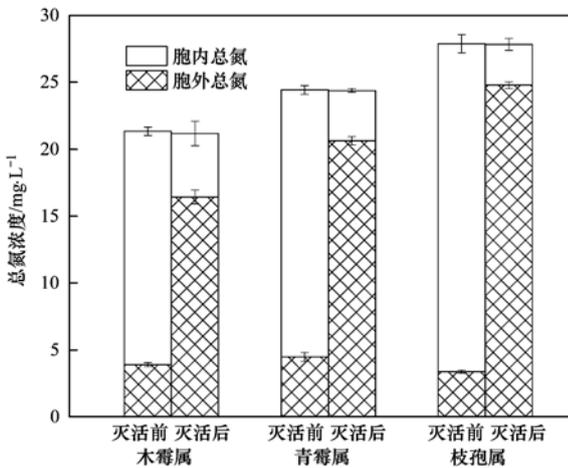


图 2 真菌孢子灭活前后总氮浓度变化

Fig. 2 Total nitrogen change of fungal spores before and after inactivation by chlorine

2.3 氯灭活前后 ATP、DNA 和蛋白质变化

2.3.1 灭活前后 ATP 变化

ATP 是微生物生命活动的重要能量物质, ATP

浓度的高低可间接表示真菌浓度的高低, 氯灭活后细胞释放出的游离 ATP 在一定程度上反映了细胞的破坏程度. 游离 ATP 是指能够通过 0.1 μm 滤膜的 ATP 分子, 游离 ATP 占总 ATP 的比例可以表示真菌的活性状态, 结合真菌数, 还可计算出每个细胞的 ATP 含量, 其高低可表征微生物细胞的尺寸与活性^[19].

图 3(a) 中, 氯灭活前后木霉和青霉孢子的总 ATP 浓度变化不大, 枝孢属孢子的总 ATP 仅轻微降低 (降低 10.9%). 而从图 3(b) 中可明显看出, 灭活前胞外游离 ATP 量很少, 灭活后大幅增长. 这表示灭活后细胞破坏, 胞内 ATP 被释放, 且释放量与孢子大小、破坏程度成正相关, ATP 释放量为: 枝孢属 > 青霉属 > 木霉属. 经计算, 单个木霉孢子 ATP 含量约为 1.65×10^{-7} nmol, 青霉孢子为 3.65×10^{-7} nmol, 枝孢孢子为 6.51×10^{-7} nmol, 而自然水体中的每个细菌 ATP 含量约为 1.75×10^{-10} nmol^[19]. 真菌孢子大小个体差异性较大, 故其 ATP 含量也有差异, 如枝孢属最大, 其单个孢子 ATP 含量也较高, 而细菌体积小于真菌, 故其 ATP 含量也较小.

2.3.2 灭活前后 DNA、蛋白质变化

DNA 与蛋白质是细胞重要的组成部分, DNA 引导细胞发育与机能运作, 控制蛋白质合成, 蛋白质则是生物细胞中含量最高的组分. 要了解真菌孢子的存活情况, 宏观上可采用平板计数法, 微观上则可通过检测其 DNA 与蛋白质泄漏量来确定细胞的破裂死亡.

由图 4 可明显看出, 氯灭活后孢子上清液中的 DNA 与蛋白质浓度显著增大, 表明氯灭活后细胞膜被破坏, 细胞内大量 DNA 与蛋白质泄露, 造成细胞

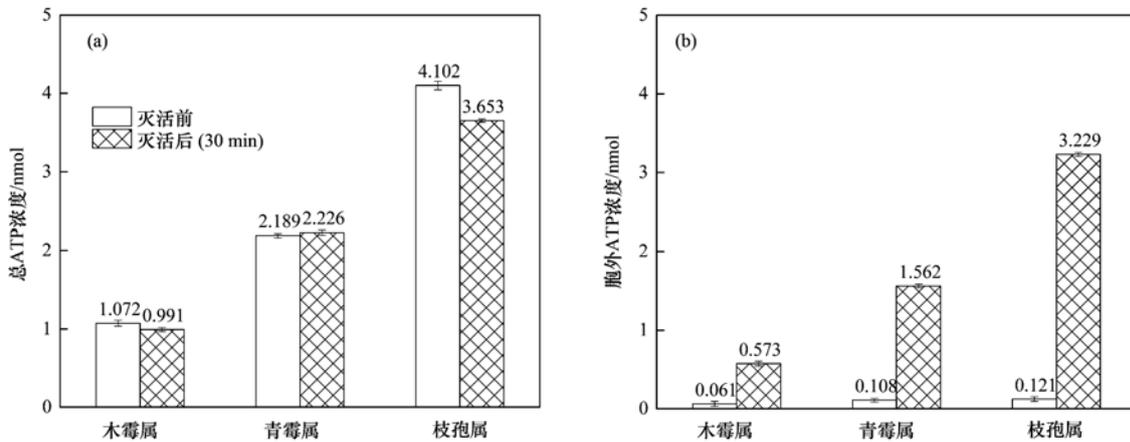


图 3 氯灭活 3 种孢子前后总 ATP 浓度及胞外 ATP 变化

Fig. 3 Change of total ATP and extracellular ATP in fungal spores before and after inactivation by chlorine

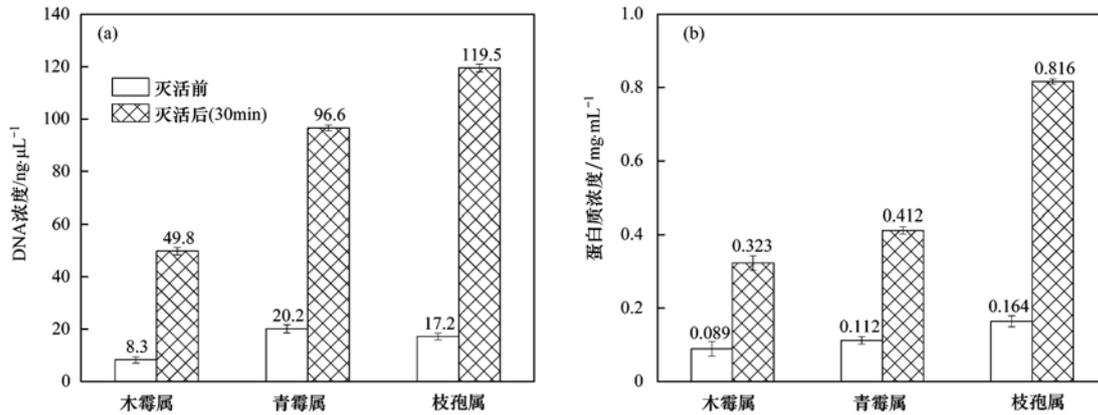


图4 氯灭活3种孢子DNA、蛋白质浓度变化

Fig. 4 Variation of DNA and protein concentrations in fungal spores before and after inactivation by chlorine

死亡。3种真菌DNA、蛋白质浓度差值：枝孢属 > 青霉属 > 木霉属，与图1中灭活难易程度对应。

2.4 氯灭活前后SEM变化

由图5可知，灭活前的真菌孢子，表面圆滑，几乎没有褶皱。木霉孢子为球形，大小在1~2 μm之间；青霉孢子形状与木霉相似，呈光滑球形，尺寸略大于木霉，在2~3 μm之间；枝孢属孢子为椭球体，

尺寸最大，长度在4~5 μm，宽度在2~3 μm之间。氯作用30 min后，3种孢子均有不同程度的破坏，由于细胞膜被破坏，渗透压改变以及胞内物质的释放，细胞出现褶皱、凹陷，形态被破坏。木霉相对破坏较轻，形态较完整，细胞壁仅褶皱凹陷，这与孢子悬液总氮浓度的变化一致；青霉破坏较重，细胞壁凹陷较重，形态较不完整；枝孢属破坏最重，细胞壁大量褶皱凹陷，形态完全被破坏。这与真菌灭活效果一致(图1)。

2.5 讨论

2.5.1 孢子特性与灭活速率的关系

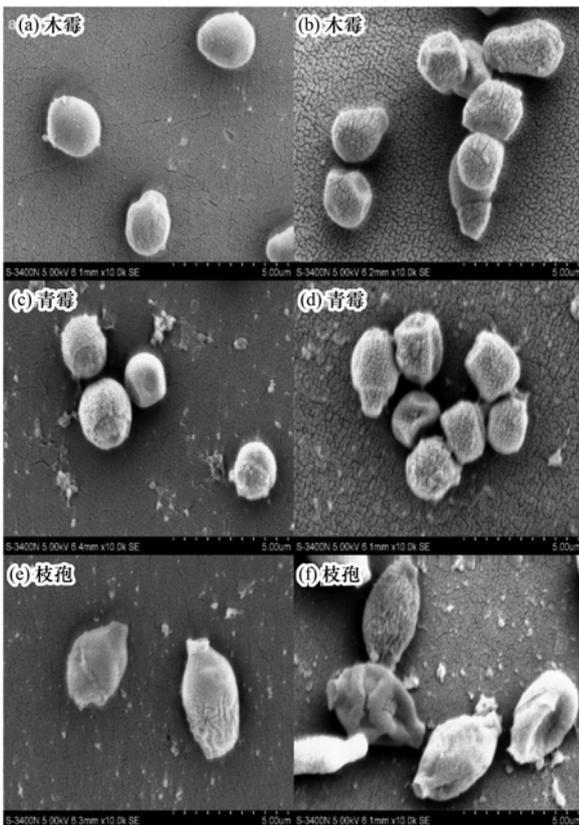
(1) 3种真菌的疏水性差异

疏水蛋白最早是由Rosenberg等^[25]在研究细菌与寄主吸附机制时提出的，指覆盖在微生物表面的疏水物质，在许多丝状真菌中已经发现疏水蛋白的存在，孢子的疏水性可防止真菌孢子丧失水分，同时在消毒中抵抗消毒剂进入孢子内部发挥作用^[26]。

表2中差值为由公式(4)计算所得疏水率(CSH)，3种真菌疏水性大小为：木霉属 > 青霉属 > 枝孢属。而氯灭活真菌的速率常数为：枝孢属(0.079 min⁻¹) > 青霉属(0.045 min⁻¹) > 木霉属(0.037 min⁻¹)，可见真菌灭活难易程度与疏水性成负相关，即真菌疏水性越大(木霉)，灭活效果越差，这主要是由于消毒剂难接近木霉孢子与之进行反应。

表2 3种真菌孢子的疏水性

真菌种类	实验组 (A _{750 nm})	对照组 (A _{750 nm})	疏水率 (CSH)/%
木霉属	0.073 ± 0.015	0.238 ± 0.016	77.9
青霉属	0.038 ± 0.004	0.172 ± 0.011	69.3
枝孢属	0.022 ± 0.009	0.055 ± 0.005	60.0



图片放大10 000倍；(a)、(c)、(e)为灭活前；(b)、(d)、(f)为灭活后

图5 氯灭活前后真菌孢子扫描电镜照片

Fig. 5 SEM photos of fungal spores before and after chlorine inactivation

(2) 3 种真菌的尺寸差异

地下水中的 3 种优势真菌, 木霉和青霉呈球状, 木霉孢子大小在 1~2 μm 之间, 青霉孢子尺寸略大于木霉, 在 2~3 μm 之间; 枝孢属孢子为椭球体, 长度在 4~5 μm , 宽度在 2~3 μm 之间. 分别采用球体和椭球体的公式计算孢子的表面积和体积, 结果如表 3 所示.

表 3 3 种真菌孢子的尺寸

Table 3 Size of three species of fungal spores

真菌种类	平均尺寸/ μm	表面积/ m^2	体积/ m^3
木霉属	1.5 (直径)	7.07×10^{-12}	1.77×10^{-18}
青霉属	2.5 (直径)	1.96×10^{-11}	8.17×10^{-18}
枝孢属	4.5 × 2.5 (长轴 × 短轴直径)	3.27×10^{-11}	1.18×10^{-16}

3 种真菌孢子的表面积和体积大小顺序为: 枝孢属 > 青霉属 > 木霉属, 这与 3 种真菌的氯灭活速率常数完全一致 [枝孢属 (0.079 min^{-1}) > 青霉属 (0.045 min^{-1}) > 木霉属 (0.037 min^{-1})]. 可见真菌孢子的灭活难易程度与孢子尺寸 (表面积和体积) 成正相关, 即真菌孢子越大 (枝孢), 灭活效果越好, 灭活速率常数越大. 这主要是由于孢子尺寸越大, 单个孢子的表面积越大, 氯可作用的位点越多, 越易被破坏.

2.5.2 真菌孢子灭活机制

通过孢子的可培养性、胞外总氮浓度、胞外特征物质 (ATP、DNA、蛋白质) 和扫描电镜等方法探究了氯灭活真菌的主要机制.

对图 1 和图 3 重新进行分析, 结果见表 4 所示, 经过 30 min 氯灭活后, 青霉和枝孢基本被灭活, 无可培养的孢子, 而还有 10% 的木霉可用 DRBC 培养基培养. 然而, 经过相同时间灭活, 剩余胞内 ATP 比例的大小顺序为: 木霉 > 青霉 > 枝孢, 这与剩余可培养的孢子比例的规律一致, 也可以反映孢子的活性^[19], 但是胞内 ATP 比例明显高于可培养孢子的比例. 这可能主要是存在有活性但不能培养的孢子 (NBVC), 即处于休眠状态^[27, 28], 然而在适当的条件下, 还可培养形成真菌菌体.

氯灭活作用主要表现在次氯酸的强氧化作

表 4 3 种真菌孢子的灭活率 (30 min)/%

Table 4 Disinfection efficiency of three species of fungal spores/%

真菌种类	可培养性	胞内 ATP 比例
木霉属	10.1 ± 3.4	42.1 ± 2.2
青霉属	0.3 ± 0.1	29.9 ± 1.4
枝孢属	0	11.6 ± 1.1

用^[22], 次氯酸是中性小分子, 容易扩散到孢子表面, 首先作用于细胞表面, 降低孢子的可培养性, 部分孢子处于休眠, 不能被培养; 然后次氯酸进一步破坏细胞膜, 增加细胞的通透性, 导致菌体内外渗透压遭到破坏, 胞内物质释放, 细胞活性完全降低. 所以, 为了保障真菌孢子的完全灭活, 不仅要降低真菌的可培养性, 还需降低真菌孢子的活性 (特别是胞内 ATP 的比例).

3 结论

(1) 氯灭活真菌孢子符合一级动力学, 满足 Chick 模型, 3 种真菌的耐氯性为: 木霉属 > 青霉属 > 枝孢属, 真菌耐氯性远强于细菌.

(2) 消毒效果与疏水性成负相关, 疏水性越大, 消毒剂越难以进入细胞内部发挥作用. 孢子尺寸越大, 单个孢子的表面积越大, 氯可作用的位点越多, 越易被破坏.

(3) 氯对细胞膜产生了破坏作用, 造成了胞内含氮有机物泄漏, 胞外特征物质 (ATP、DNA、蛋白质) 浓度显著增长, 孢子细胞凹陷、表面褶皱、形态有不同程度的破坏.

(4) 氯先作用于细胞表面, 降低孢子的可培养性, 然后进一步破坏细胞膜, 增加细胞的通透性, 导致菌体胞内物质释放, 细胞活性完全降低.

参考文献:

- [1] Doggett M S. Characterization of fungal biofilms within a municipal water distribution system [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(3): 1249-1251.
- [2] Bucheli T D, Wettstein F E, Hartmann N, et al. Fusarium mycotoxins: overlooked aquatic micropollutants? [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, **56**(3): 1029-1034.
- [3] Hageskal G, Lima N, Skaar I. The study of fungi in drinking water [J]. *Mycological Research*, 2009, **113**(2): 165-172.
- [4] Anaissie E J, Kuchar R T, Rex J H, et al. Fusariosis associated with pathogenic *Fusarium* species colonization of a hospital water system: a new paradigm for the epidemiology of opportunistic mold infections [J]. *Clinical Infectious Diseases*, 2001, **33**(11): 1871-1878.
- [5] Ma X, Baron J L, Vikram A, et al. Fungal diversity and presence of potentially pathogenic fungi in a hospital hot water system treated with on-site monochloramine [J]. *Water Research*, 2015, **71**: 197-206.
- [6] Muittari A, Kuusisto P, Virtanen P, et al. An epidemic of extrinsic allergic alveolitis caused by tap water [J]. *Clinical & Experimental Allergy*, 1980, **10**(1): 77-90.
- [7] Aslund P. Skin irritations cause by moulds (in Swedish) [J]. *Var Föda*, 1984, **36**: 327-336.
- [8] Hageskal G, Gaustad P, Heier B T, et al. Occurrence of moulds in drinking water [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2007,

- 102(3): 774-780.
- [9] Dukan S, Touati D. Hypochlorous acid stress in *Escherichia coli*: resistance, DNA damage, and comparison with hydrogen peroxide stress[J]. *Journal of Bacteriology*, 1996, **178** (21): 6145-6150.
- [10] 张晋珠. 西安市供水系统中消毒副产物变化及控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
Zhang J Z. Study on the change and control of disinfection byproducts in drinking water supply system in Xi'an city [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [11] Pereira V J, Marques R, Marques M, *et al.* Free chlorine inactivation of fungi in drinking water sources [J]. *Water Research*, 2013, **47**(2): 517-523.
- [12] Pereira V J, Basílio M C, Fernandes D, *et al.* Occurrence of filamentous fungi and yeasts in three different drinking water sources[J]. *Water Research*, 2009, **43**(15): 3813-3819.
- [13] Jung Y J, Oh B S, Kang J W. Synergistic effect of sequential or combined use of ozone and UV radiation for the disinfection of *Bacillus subtilis* spores[J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1613-1621.
- [14] 王云, 鲁巍, 张晓健. 氯及氯胺灭活大肠杆菌的消毒动力学模型[J]. *环境科学*, 2005, **26**(5): 100-104.
Wang Y, Lu W, Zhang X J. Modeling of inactivation kinetics of *E. coli* with free chlorine and monochloramine [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(5): 100-104.
- [15] Zhang Y J, Zhang Y Q, Zhou L I, *et al.* Factors affecting UV/H₂O₂ inactivation of *Bacillus atrophaeus* spores in drinking water [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2014, **134**: 9-15.
- [16] Rosenberg M. Microbial adhesion to hydrocarbons: twenty-five years of doing MATH[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, **262**(2): 129-134.
- [17] 孙晓莹, 施汉昌, 全向春, 等. 细菌细胞表面疏水性及在活性污泥中粘附率影响因素研究[J]. *环境科学*, 2008, **29** (10): 2809-2814.
Sun X Y, Shi H C, Quan X C, *et al.* Factors influencing bacterial cell-surface hydrophobicity and bacterial adhesion ratio to activated sludge flocs[J]. *Environmental Science*, 2008, **29** (10): 2809-2814.
- [18] HJ 636-2012, 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].
- [19] Hammes F, Goldschmidt F, Vital M, *et al.* Measurement and interpretation of microbial adenosine tri-phosphate (ATP) in aquatic environments [J]. *Water Research*, 2010, **44** (13): 3915-3923.
- [20] Kang M H, Pengkit A, Choi K, *et al.* Differential inactivation of fungal spores in water and on seeds by ozone and arc discharge plasma[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(9): e0139263.
- [21] Dalrymple O K, Stefanakos E, Trots M A, *et al.* A review of the mechanisms and modeling of photocatalytic disinfection [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2010, **98**(1-2): 27-38.
- [22] 陈雨乔. 饮用水系统中耐氯性细菌消毒特性及机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
Chen Y Q. Study on the inactivation characteristics and mechanism of the chlorine-resistant bacteria in drinking water system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [23] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [24] Dai J H, Qu H, Yu Z S, *et al.* Computational analysis of AnmK-like kinase: new insights into the cell wall metabolism of fungi [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2015, **379**: 59-65.
- [25] Rosenberg M, Kjelleberg S. Hydrophobic interactions: role in bacterial adhesion[A]. In: Marshall K C (Ed.). *Advances in Microbial Ecology* [M]. New York: Springer, 1986. 353-393.
- [26] 林福呈. 真菌疏水蛋白的研究进展[J]. *微生物学报*, 2001, **41**(4): 518-521.
Lin F C. Recent researches on fungal hydrophobins [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2001, **41**(4): 518-521.
- [27] 丁林贤, 苏晓梅, 横田明. 活的但非可培养(VBNC)状态菌的研究进展[J]. *微生物学报*, 2011, **51**(7): 858-862.
Ding L X, Su X M, Heng T M. Research progress of VBNC bacteria-a review [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2011, **51** (7): 858-862.
- [28] Colwell R R, Brayton P R, Grimes D J, *et al.* Viable but non-culturable *Vibrio cholerae* and related pathogens in the Environment: implications for release of genetically engineered microorganisms[J]. *Nature Biotechnology*, 1985, **3**(9): 817-820.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggyery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行