

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

**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

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 ..... 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 ..... 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中汞形态污染及其与碳组分的关系 ..... 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM<sub>2.5</sub> 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 ..... 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 ..... 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 ..... 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 ..... 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 ..... 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM<sub>2.5</sub> 日均值变化分析: 以常州为例 ..... 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 ..... 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 ..... 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 ..... 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 ..... 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 ..... 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 ..... 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 ..... 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 ..... 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 ..... 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 ..... 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 ..... 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 ..... 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO<sub>2</sub>/膨润土复合材料对 Hg<sup>2+</sup> 的吸附性能研究 ..... 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 ..... 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 ..... 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 ..... 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 ..... 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N<sub>2</sub>O 的产生特性 ..... 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 ..... 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 ..... 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 ..... 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 ..... 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 ..... 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 ..... 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 ..... 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 ..... 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 ..... 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 ..... 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 ..... 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 ..... 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 ..... 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 ..... 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 ..... 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 ..... 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 ..... 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 ..... 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 ..... 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 ..... 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 ..... 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体增殖与生物转化的影响 ..... 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 ..... 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

# 配水管网细菌活性影响因素

王晓丹<sup>1,2</sup>, 赵新华<sup>1</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 中节能咨询有限公司, 北京 100082)

**摘要:** 为研究配水管网水中细菌活性的变化规律, 以北方某市实验室模拟配水管网为对象, 应用荧光显微镜对经吖啶橙染色的细菌进行直接镜检并计数, 以更准确地对细菌活性进行定量分析. 以活菌数占细菌总数的比值来表征整体细菌活性, 并研究多种因素对配水管网水中细菌活性的影响. 结果表明, 吖啶橙染色荧光显微镜直接镜检应用于管网水中细菌计数能够快速得到较稳定的结果, 计数结果重现性好. 试验水样中的活菌数  $10^3 \sim 10^4$  cells·mL<sup>-1</sup>, 细菌总数  $10^4 \sim 10^5$  cells·mL<sup>-1</sup>. 管网水中整体细菌活性与水温、浊度和流速都存在正相关关系; 与运行稳定后的水中余氯存在负相关关系. 模拟配水管网水中常见形态的细菌对次氯酸钠消毒剂的耐受能力依次为: 短杆形菌 > 球形菌 > 长杆形菌 > 弧形菌, 并且杆形菌恢复活性和再繁殖的能力较强. 夏季水样中短杆形菌多于冬季.

**关键词:** 配水管网; 吖啶橙; 荧光显微镜; 细菌计数; 细菌活性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0622-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.201604029

## Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks

WANG Xiao-dan<sup>1,2</sup>, ZHAO Xin-hua<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. CECEP Consulting Co., Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract:** In order to study the variation patterns of bacterial activity in water distributed networks, this paper studied a simulated water distribution network in a northern China city. Microscopic examination and bacterial counts were conducted on acridine orange-stained bacteria using fluorescence microscopy to ensure precise quantitative analysis. The ratio of viable bacterial count to total bacterial count was used to characterize the overall bacterial activity in the drinking water distribution network, as well as to study the impacts imposed by various factors. As indicated, this method was proved to be rapid, reliable and repeatable in bacterial counts. Populations of viable bacteria and total bacteria in water samples were  $10^3 \sim 10^4$  cells·mL<sup>-1</sup> and  $10^4 \sim 10^5$  cells·mL<sup>-1</sup>, respectively. There was a positive correlation between the bacterial activity and water temperature, turbidity, and flow velocity. There was also a negative correlation between bacterial activity and residual chlorine after the operation stabilized. The capacity of different forms of bacteria in the simulated water distribution networks with tolerance of sodium hypochlorite was in the following order: long-rod-shaped, spherical-shaped, short-rod-shaped, and curved-shaped. The reactivation and reproduction capability of rod-shaped bacteria was stronger. There were more short-rod-shaped bacteria in summer water samples than in winter.

**Key words:** water distribution networks; acridine orange; fluorescence microscopy; bacterial count; bacterial activity

饮用水安全直接关系到城乡居民的身体健康及社会经济稳定发展, 所以国家高度重视饮用水安全问题, 相继发布了《全国城市饮用水安全保障规划(2006-2020年)》<sup>[1]</sup>、《城市供水水质管理规定》<sup>[2]</sup>、《水污染防治行动计划》<sup>[3]</sup>等一系列文件, 修订了《生活饮用水卫生标准》<sup>[4]</sup>并于2012年7月1日起在我国全面实施, 饮用水安全保障力度不断加大. 针对目前我国原水微污染的水质状况, 供水企业一方面通过改造和强化传统工艺, 并增加预处理或深度处理工艺, 使出厂水质达到新的标准, 另一方面则通过强化消毒工艺和控制管网余氯量来保证管网的微生物学指标达标.

经过工艺处理进入管网的饮用水中的微生物不能完全被灭活, 一旦条件变化(余氯衰减, 残存的营养物质浓度变化等), 有一部分就会在管网中繁

殖和恢复活性, 这其中还存在着活的但不可培养的微生物(viable but non-culturable, VBNC)<sup>[5]</sup>, 这些微生物无法通过细菌培养的方法<sup>[6]</sup>检出. VBNC中如果存在致病菌<sup>[7]</sup>, 在适宜环境条件下复活并大量繁殖<sup>[8]</sup>, 则直接威胁到饮用水水质安全. 因此, 快速、准确地进行管网水微生物的定量定性, 是供水企业能够迅速采取措施控制微生物生长繁殖, 保证供水水质卫生安全的前提. 近年来, 国内外研究者不断采用新的细菌检测方法<sup>[9-13]</sup>对细菌进行快速计数, 取得了很好的效果.

为克服传统培养方法计数结果偏低、培养时间

收稿日期: 2016-04-06; 修订日期: 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478086)

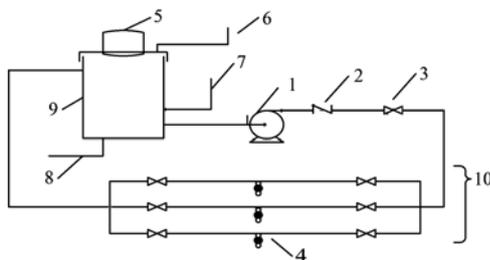
作者简介: 王晓丹(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为饮用水水质及节能环保政策, E-mail: wangxiaodan@cecep.cn

长以及部分微生物无法检出的局限性,本研究采用快速准确且操作相对简便的荧光显微镜直接镜检法,对配水管网水中的细菌进行计数和观察. 本研究以活菌数占细菌总数的比值来表征试验管网水的整体细菌活性,并对饮用水中常见形态细菌以及整体细菌活性受余氯、温度、浊度、流速等因素影响的变化进行了分析,结果对快速预估配水管网中生物安全性风险具有一定意义,同时也有利于供水企业根据预估结果调整工艺参数、保障供水安全.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验管网与试验采样

虽然试验管网与实际配水管网的环境条件存在一些差异,但是采用试验管网能够根据试验需要来调节影响细菌生长的参数变化,更好地了解细菌数量和整体活性受多个因素影响的变化规律. 为了模拟实际配水管网水中细菌的生长变化情况,按图 1 所示,采用 PE 管、闸阀、流量计、循环水箱及离心泵等管件与设备,在实验室搭建了模拟配水管网. 试验用水直接引自北方某市配水管网. 装置启动后,首先投加次氯酸钠溶液使水中自由余氯的初始值接近实际水厂清水池出水的余氯值;其次通过试验用水的封闭循环来模拟饮用水在实际配水管网中的流动;最后在取样点采样进行试验. 取样点选在模拟管网主干管上的中点,以间隔一定时间的采样分析结果,来模拟实际配水管网的沿程水质. 本研究于 2014 年 8 月至 2015 年 7 月对选定取样点进行取样,水样按照标准方法采集后尽快送回实验室进行分析,并按照国家标准方法<sup>[14]</sup>对研究需要的指标进行测定.



1. 离心泵; 2. 止回阀; 3. 闸阀; 4. 取样龙头;  
5. 密封与平衡装置; 6. 加药管; 7. 进水管;  
8. 排水管; 9. 循环水箱; 10. 管网示意

图 1 模拟配水管网示意

Fig. 1 Schematic diagram of simulative water distribution network

### 1.2 仪器与药品

总余氯与自由余氯: 使用 HACH46 700-001 型总

氯-余氯仪; HACH-DPD 自由余氯测定药剂, HACH-DPD 总余氯测定药剂. 浊度: HACH2100AN 型浊度仪. 细菌总数和活菌数: 使用 Olympus-BX51 型荧光显微镜, 采用吖啶橙(acridine orange)染色镜检.

吖啶橙是技术相对成熟的荧光镜检染色剂. 它能够透过细胞膜, 与细胞核内的 DNA 和细胞质内的 RNA 结合, 并在波长为 436 ~ 490 nm 的激发光的激发下发出荧光. 它与 DNA 结合可发射出黄绿色或绿色荧光, 与 RNA 结合可发出橙色至鲜红色荧光. 即使 DNA 在没有活性的细胞内, 吖啶橙也能与其结合将其染色, 因此可以用来计数细菌总数.

### 1.3 试验方法

细菌总数计数采用吖啶橙染色直接计数法<sup>[15]</sup> (acridine orange direct counts, AODC). 水样用无菌磨口玻璃瓶采集后迅速加入甲醛固定, 甲醛最终含量 2%. 将 0.5 mL 含量为 0.2% 的吖啶橙(BBI 公司)溶液加入 10 mL 固定后水样中, 染色 1 ~ 2 min. 染色后的水样使用溶剂负压过滤器以微孔滤膜(孔径 0.2  $\mu\text{m}$ , 直径 47 mm, 黑色聚碳酸酯膜, Millipore 公司)过滤. 将过滤后的滤膜置于载玻片上并固定, 用落射荧光显微镜观察, 计数发绿色或橙色荧光的菌体. 显微镜光源为汞灯, 激发光滤光片 450 ~ 490 nm, 光束分离滤光片 510 nm, 阻挡滤光片 520 nm. 随机选取 10 个视野的计数结果取平均值, 根据视野面积和过滤面积的比值计算出单位体积水样中的细菌数量.

活菌数计数采用活菌直接计数法<sup>[16]</sup> (direct viable counts, DVC-N. A). 向 10 mL 水样中加入最终含量为 0.002% 的萘啶酮酸(nalidixic acid, N. A, BBI 公司)和最终含量为 0.025% 的酵母膏(上海生工生物工程公司), 25 $^{\circ}\text{C}$  避光培养 6 h 后用甲醛固定. 再将固定后的水样按照 AODC 法直接镜检计数, 视野中长大或变粗的菌体被认为是活菌.

## 2 结果与分析

### 2.1 细菌计数结果比较

加氯后在试验管网取水点取样, 随着余氯不断衰减取多组水样, 并从中选取 4 组水样, 分别使用  $R_2A$  培养基平板计数和吖啶橙染色直接计数两种不同方法对水样中的细菌进行计数. 每组水样均取等量的 6 份, 即每种计数方法对每组水样平行测定 3 次, 取计数结果的平均值. 两种方法对 4 组水样中细菌的计数结果见表 1. 使用  $R_2A$  作为培养基的平板计数法得到水样中的活菌数在  $10^0 \sim 10^2$

cfu·mL<sup>-1</sup>,而吡啶橙染色荧光显微镜直接镜检计数法得到水样中的活菌数在 10<sup>3</sup> ~ 10<sup>4</sup> cells·mL<sup>-1</sup>,比使用 R<sub>2</sub>A 作为培养基的平板计数法高出 1 ~ 3 个量级,明显高于培养法.直接镜检计数法不仅能够计数活细菌,还能够计数受损和死亡细菌数量,得到水样中的细菌总数在 10<sup>4</sup> ~ 10<sup>5</sup> cells·mL<sup>-1</sup>.类似的试

验在冬季也进行了运行,并与夏季运行的结果对比.冬季的 HPC-R<sub>2</sub>A 法计数结果在 10<sup>0</sup> ~ 10<sup>2</sup> cfu·mL<sup>-1</sup>,检出量级更低,甚至有个别水样未检出.而镜检计数结果检出的量级仍在 10<sup>3</sup> ~ 10<sup>4</sup> cells·mL<sup>-1</sup>.且镜检法能够直观地观察到细菌的形态,有助于更好地掌握细菌的变化规律(见图 2).

表 1 R<sub>2</sub>A 培养法和 AO 染色镜检法细菌计数结果比较

Table 1 Results of R<sub>2</sub>A plate counts compared with AO direct counts

水样编号	水样余氯及水温	活菌数		细菌总数
		R <sub>2</sub> A 平板培养法 /cfu·mL <sup>-1</sup>	AO 染色镜检法 /cells·mL <sup>-1</sup>	(AO 染色镜检法) /cells·mL <sup>-1</sup>
1	初始加氯,余氯 0.85 mg·L <sup>-1</sup> , t = 15℃	108	22 680	150 005
2	余氯 0.5 mg·L <sup>-1</sup> , t = 16.8℃	80	19 549	102 258
3	余氯 0.3 mg·L <sup>-1</sup> , t = 17.5℃	50	15 518	130 508
4	余氯 0.0 mg·L <sup>-1</sup> , t = 19℃	130	32 229	159 156

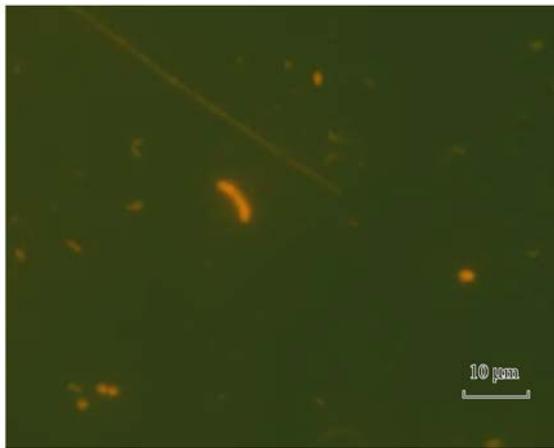


图 2 不同形态细菌

Fig. 2 Different forms of bacteria

## 2.2 不同理化指标下细菌数量和总体活性的变化

### 2.2.1 不同余氯量下细菌数量和总体活性的变化

采用活菌数与细菌总数的比值来表征管网中细菌的整体活性.细菌数量和总体活性与余氯衰减的

关系见图 3.向循环水箱中投加次氯酸钠溶液后,马上开始取样测定.测定活菌数为 22 680 cells·mL<sup>-1</sup>(各形态活菌占活菌总数的比例见表 2),活菌数占细菌总数的比例为 15.12%.当余氯浓度达到最大值时,活菌的数量开始减少.此时水样中活菌数为 21 088 cells·mL<sup>-1</sup>,活弧菌所占比例显著降低(见表 2),在活菌比例最低时(达 9.21%),活菌中短杆形菌所占的比例较余氯浓度最大时提高了 5.8%,而此时球形菌和长杆形菌所占比例变化不大,弧菌所占比例降至为 0(见表 2).随着余氯的衰减,活菌所占比例不断增大,而且活菌中杆形菌的数量增速更快(图 4),平均数量增速(从活菌比例最低至循环结束时间段内)为 46 cells·(mL·min)<sup>-1</sup>,而球形菌和弧菌仅为 30 cells·(mL·min)<sup>-1</sup>和 7 cells·(mL·min)<sup>-1</sup>.当水中余氯浓度低于 0.3 mg·L<sup>-1</sup>时,活菌在细菌总数中所占比例开始增大,最高可达到 20.25%,远高于余氯浓度为 0.52 mg·L<sup>-1</sup>时 9.34% 的活菌比例.

表 2 水循环中不同时刻各形态细菌所占比例

Table 2 Proportions of different forms of bacteria at different moments of water circulation

项目	活菌数/cells·mL <sup>-1</sup>	各形态细菌所占比例/%			
		球形菌	短杆形菌	长杆形菌	弧形菌
运行初始时(0 min)	22 680	38.6	29.8	21.1	10.5
余氯浓度最大时(20 min)	21 088	39.6	32.1	22.6	5.7
活菌数比例最低时(60 min)	11 539	38.0	37.9	24.1	0

### 2.2.2 不同温度下细菌数量和总体活性的变化

模拟管网用水来自以地表水为水源的市政管网,所以四季水温相差较大,冬季的试验水温一般低于 11℃,而夏季的试验水温一般高于 19℃.分别选取每月平行试验中余氯约为 0.55、0.30 和 0.00 mg·L<sup>-1</sup>的水样,分析不同季节细菌数量和总体活性

受水温影响的变化规律(图 5).在余氯低于 0.3 mg·L<sup>-1</sup>时,活菌数占细菌总数的比值因为温度的不同而相差较大,可达 2.48%.对比不同季节 66 份管网水样的镜检结果,未投加次氯酸钠时,夏季水样中杆形菌占细菌总数的 62.8% ~ 68.3%,高于冬季的 52.9% ~ 66.7%,而在活菌比例最低时夏季试验水

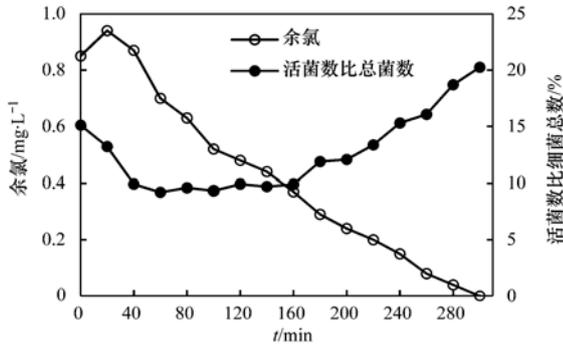


图3 整体细菌活性受余氯影响的变化  
Fig. 3 Variation of overall bacterial activity affected by residual chlorine

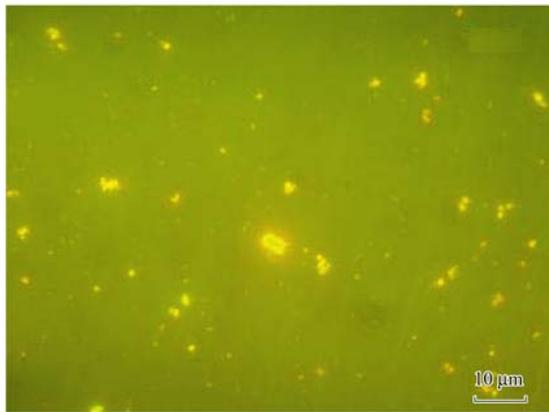


图4 低残留余氯浓度水样中的活菌  
Fig. 4 Viable bacteria in water sample with low residual chlorine concentration

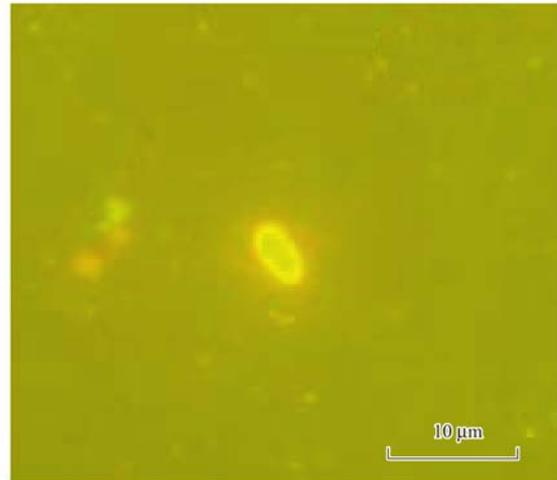


图6 夏季水样中经过培养的活短杆形菌  
Fig. 6 Viable brevibacterium in cultured summer water sample

样中杆形菌占细菌总数的45.1%~54.7%，低于冬季管网中的58.7%~62.6%，说明在水温较高时，杆形菌对次氯酸钠的耐受性变差。另外，在夏季水样中存在许多活的短杆形菌(见图6)，是冬季水样中少见的。

季节不同循环未投加消毒剂之前的试验循环水，样品编号按浊度由小到大排列，分别测定了浊度和活菌数，结果见图7。浊度与活菌数之间的相关系数高达0.9798。

余氯约为0.3 mg·L<sup>-1</sup>时不同浊度下的计数结果(图8)，浊度最大值2.28 NTU，最小值1.64 NTU，相差0.64 NTU；活菌数占细菌总数的比值相应地相差2.95%。浊度超过2 NTU时，活菌数比例增大明显。由于试验采用的是自建的管网，每次运行前虽然对管网进行冲洗，但难免会有少量的搭建管网时残留的管材碎屑。另外，运行前的冲洗突然改变了管网的水力条件，冲刷了管壁附着的细菌及沉淀物质，也增加了试验用水的浊度。并且，试验用水引自的管网是年代较远的传统管材管网，其中的水自身浊度较高。上述原因造成了试验水浊度基本高于0.5 NTU。

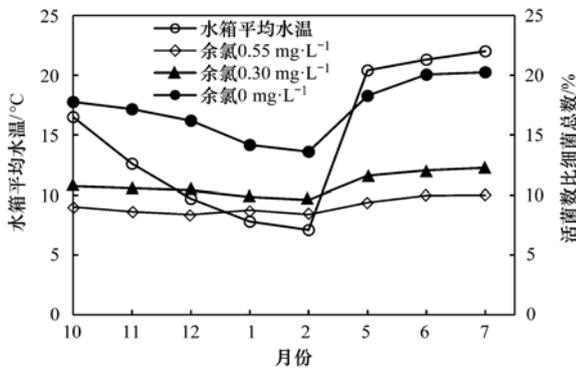


图5 整体细菌活性受不同月份水温的影响  
Fig. 5 Variation of overall bacterial activity affected by water temperature in different months

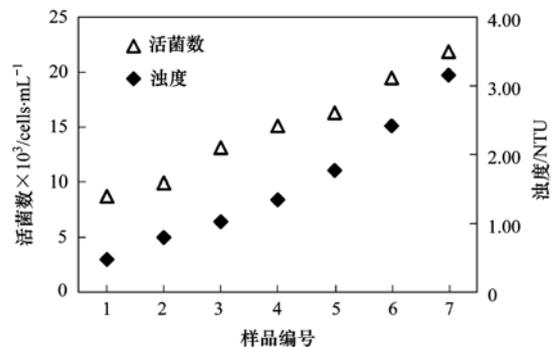


图7 活菌数与浊度的相关性

Fig. 7 Correlation between the number of viable bacteria and turbidity

2.2.3 不同浊度下细菌数量和总体活性的变化

为了研究浊度与细菌数量之间的关系，取不同

2.2.4 不同流速下细菌数量和总体活性的变化

为了缩短研究时间，尽快取得管壁生物膜，所以试验管网在设计和运行时均考虑到流速的问题，使

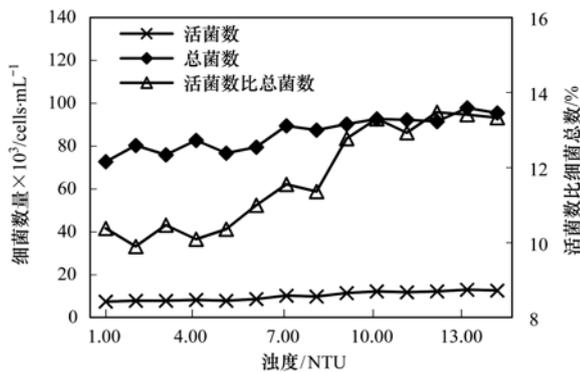


图 8 整体细菌活性受浊度的影响

Fig. 8 Variation of overall bacterial activity affected by turbidity

实际运行的流速低于经济流速. 试验配水管网中水的流速通过每个管段上的阀门控制在  $0.4 \sim 1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 被冲刷下来的生物膜会悬浮在水样中, 在染色过滤时被截留在微孔滤膜上. 由图 9 可见被冲刷下的生物膜内存在活菌.

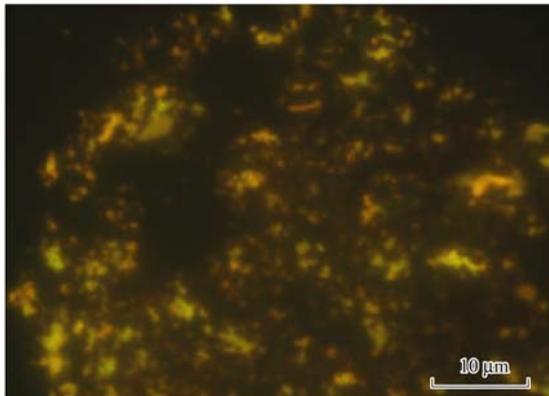


图 9 被冲刷下来的管壁生物膜

Fig. 9 Scoured biofilm from pipe wall

在封闭循环试验结束后, 保持主干管流量为  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  运行(采用非循环方式) 18 h, 分别在试验管网始端管段的上游和下游龙头取水样(样品 1 和 2), 之后迅速旋该管段上下游阀门至开启度最大,

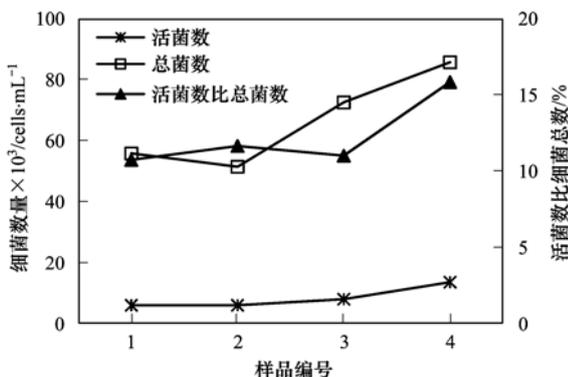


图 10 整体细菌活性受流速的影响

Fig. 10 Variation of overall bacterial activity affected by flow rate

并同时在这两个龙头再取水样(样品 3 和 4), 分别测定 4 个水样中活菌数和细菌总数, 测定结果见图 10. 可见流速的突然增大从管壁上冲刷下生物膜, 引起了水中细菌数量的增多, 尤其是活菌数量的增幅更大, 导致水中整体细菌活性增强. 因此, 尽量避免引起流速突变(如水锤等现象), 防止管网中流速突然增大, 也是控制饮用水中细菌数量激增的有效措施.

### 3 讨论

#### 3.1 细菌计数方法的比较

琼脂平板计数法(agar plate counts)是至目前国内应用最广泛且使用时间最长的饮用水中异养菌的计数方法. 近年来也有很多研究者使用  $R_2A$  培养基进行平板培养计数来克服受损菌体不能在营养琼脂培养基上正常生长的局限性, 使计数结果更高<sup>[17]</sup>. 但是培养基为细菌提供的生长环境还是与饮用水系统的贫营养环境差异较大, 使用培养方法检测饮用水系统中的所有细菌还是难以获得较为准确的结果, 有个别样品还会因为涂布时的操作不当造成污染而得不到计数结果. 并且使用 HPC- $R_2A$  法培养, 细菌生长缓慢, 数量一般从培养的第 4 d、第 5 d 开始才增多较快, 那么要想得到准确的计数结果, 采用常规的 7 d 培养法是不够的, 不能使供水企业迅速地得到细菌数量超标的信息并及时采取控制措施. 虽然扫描电镜使视野清晰, 但是对于观察前细菌的分离技术要求较高, 且前处理时间也稍长, 所以还多用于对观察细菌形态<sup>[18]</sup>. 利用流式细胞术、ATP 方法、分子探针、基因芯片等测定饮用水中的微生物也能快速获得相对准确的计数结果<sup>[19~23]</sup>, 但是对操作人员的要求较高, 也不能作为供水企业的首选. 而荧光显微镜镜检法可以直接对水样中的细菌进行计数, 对细菌的生长环境改变不大. 而且荧光显微镜观察计数十分快捷, 从取样至检出只需 30 min 左右. 显微镜直接镜检计数法快捷、稳定、经济性好, 是在实际应用中对于饮用水管网中细菌进行快速计数的可行方法.

#### 3.2 细菌数量和整体活性受理化指标影响的变化规律

##### 3.2.1 细菌数量和整体活性受余氯影响的变化规律

由前述试验结果可知, 在投氯的初始时刻, 消毒剂中的有效成分还未完全对微生物产生作用, 活菌的比例还很高. 余氯浓度最大时, 弧形菌比例较初始时刻大幅降低, 而其它形态细菌比例变化没有过

于明显,说明配水管网水中的大部分种属的弧形菌对次氯酸钠消毒剂的耐受力较杆形菌和球形菌弱. 活菌比例最低时,短杆形菌比例升高而弧形菌比例几乎降至为零,长杆形菌和球形菌比例变化不大,说明配水管网水中的短杆形菌对次氯酸钠消毒剂的耐受力最强. 另外,余氯对于细菌的灭活相对于余氯衰减存在时间上的滞后性,即余氯浓度最大时,活菌比例并未达降至最低,尤其是对于菌胶团中细菌的灭活. 随着余氯衰减,杆形菌比例增长明显,说明杆形菌的繁殖和活性恢复能力较强. 活弧形菌的再次出现说明消毒剂并不能完全杀灭水中的细菌<sup>[24]</sup>,而是杀灭一部分细菌,对另一部分细菌仅能发挥抑制活性作用. 所以这时虽然水中仍存有一定浓度的余氯,但是已不能有效地控制细菌的繁殖和活性恢复.

### 3.2.2 细菌数量和整体活性受温度影响的变化规律

水温高时整体细菌活性较强,因为水温高有利于细菌的繁殖. 而且水温高时余氯的衰减加快,也相应减小了余氯的灭活作用. 水温高时杆形菌比例相对低,说明杆形菌对温度较高时的消毒剂较敏感,即杆形菌对热力消毒敏感. 根据地下水和地表水的水温特点,由以上分析可知,夏季的地表水更有利于细菌的生长繁殖和活性恢复,所以采用地表水水源的水厂在夏季更应关注微生物学指标.

### 3.2.3 细菌数量和整体活性受浊度影响的变化规律

水中的微生物会附着在悬浮颗粒上呈离散的非溶解状态,这些悬浮颗粒给微生物的生长繁殖提供了保护<sup>[25]</sup>. 所以美国在 2002 年把浊度列入了微生物学指标,指标限值也更为严格<sup>[26]</sup>. 由试验结果可知配水管网水中的浊度大则细菌数量多,整体细菌活性也强,说明活菌受到了悬浮颗粒包裹物的保护. 实测的浊度与活菌数之间的相关系数高达 0.979 8,即微生物繁殖和复活在一定程度上也取决于浊度的高低. 因此,控制出厂水及配水管网中的浊度水平,对于控制活菌数也是有效措施.

### 3.2.4 细菌数量和整体活性受流速影响的变化规律

当流速大时由于水力剪切作用,附着在管壁上的生物膜会被水流冲刷下来,并随着水流流向管网下游,造成细菌数量的激增. 并且这些生物膜给细菌的生长繁殖和避开灭活提供了保护<sup>[27]</sup>. 流速的增大使得从管壁上冲刷下更多的生物膜,引起了水中细菌数量的增多,尤其是活菌数量的增幅更大,导致水中整体细菌活性增强. 因此,尽量避免管网中流速突然增大,也是控制饮用水中细菌数量激增的有效措施.

### 3.3 吡啶橙染色荧光显微镜直接镜检法需要注意的问题

吡啶橙不但可以将水中的微生物染色,还可将部分杂质染色,因此镜检观察时应只计数细胞形态的荧光物. 水样要充分过滤,否则残留在膜上的水痕会干扰观察. 观察计数每个视野前应使部分干扰物的荧光淬灭.

## 4 结论

(1)吡啶橙染色荧光显微镜直接镜检应用于计数模拟配水管网中的微生物数量能够得到较稳定的结果. 计数得到水样中的活菌数在  $10^3 \sim 10^4$  cells·mL<sup>-1</sup>,比使用 R<sub>2</sub>A 作为培养基的平板计数法高出 1~3 个量级;水样中的细菌总数在  $10^4 \sim 10^5$  cells·mL<sup>-1</sup>. 每个水样的镜检时间仅需 30 min 左右. 所以吡啶橙染色荧光显微镜直接镜检是对配水管网中细菌进行计数的较优方法.

(2)模拟配水管网水中整体细菌活性与水温、浊度和流速都存在正相关关系;与运行稳定后的余氯存在负相关关系. 可根据细菌活性确定不同季节和原水水质下的更准确的投氯量.

(3)模拟配水管网水中常见形态的细菌对次氯酸钠消毒剂的耐受力依次为:短杆形菌 > 球形菌 > 长杆形菌 > 弧形菌,并且杆形菌恢复活性和再繁殖的能力较强. 夏季水样中短杆形菌多于冬季.

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 关于印发全国城市饮用水卫生安全保障规划的通知[EB/OL]. <http://www.nhfp.gov.cn/zwgkzt/pzxgzh/201201/53949.shtml>, 2012-01-17.
- [2] 中华人民共和国建设部. 城市供水水质管理规定[EB/OL]. [http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2007-04/18/content\\_586287.htm](http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2007-04/18/content_586287.htm), 2007-04-18.
- [3] 国务院. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm), 2015-04-02.
- [4] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].  
GB 5749-2006, Standards for drinking water quality[S].
- [5] Higgins M J, Chen Y C, Murthy S N, et al. Reactivation and growth of non-culturable indicator bacteria in anaerobically digested biosolids after centrifuge dewatering [J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 665-673.
- [6] GB/T 5750.12-2006, 生活饮用水标准检验方法 微生物指标[S].  
GB/T 5750.12-2006, Standard examination methods for drinking water-microbiological parameters[S].
- [7] Liu Y M, Wang C, Tyrrell G, et al. Production of Shiga-like toxins in viable but nonculturable *Escherichia coli* O157: H7[J].

- Water Research, 2010, **44**(3): 711-718.
- [ 8 ] Jjemba P K, Weinrich L A, Cheng W, *et al.* Regrowth of potential opportunistic pathogens and algae in reclaimed-water distribution systems [ J ]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, **76**(13): 4169-4178.
- [ 9 ] 鲁巍, 王云, 张晓健. 饮用水中几种细菌计数方法的比较 [ J ]. 环境科学, 2004, **25**(4): 167-169.  
Lu W, Wang Y, Zhang X J. Methods of enumeration of bacteria in drinking water [ J ]. Environmental Science, 2004, **25**(4): 167-169.
- [ 10 ] Kahlisch L, Henne K, Gröbe L, *et al.* Assessing the viability of bacterial species in drinking water by combined cellular and molecular analyses [ J ]. Microbial Ecology, 2012, **63**(2): 383-397.
- [ 11 ] Lautenschlager K, Hwang C, Liu W T, *et al.* A microbiology-based multi-parametric approach towards assessing biological stability in drinking water distribution networks [ J ]. Water Research, 2013, **47**(9): 3015-3025.
- [ 12 ] Lautenschlager K, Hwang C, Ling F Q, *et al.* Abundance and composition of indigenous bacterial communities in a multi-step biofiltration-based drinking water treatment plant [ J ]. Water Research, 2014, **62**: 40-52.
- [ 13 ] 李培珏, 侯晨晔, 李勇, 等. 荧光快检法用于工艺用水微生物检测的研究 [ J ]. 工业微生物, 2016, **46**(1): 42-46.  
Li P J, Hou C Y, Li Y, *et al.* Detection of microbiological contaminants in process water by fluorescence-based rapid detection method [ J ]. Industrial Microbiology, 2016, **46**(1): 42-46.
- [ 14 ] 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. 276-531.
- [ 15 ] Hobbie J E, Daley R J, Jasper S. Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy [ J ]. Applied and Environmental Microbiology, 1977, **33**(5): 1225-1228.
- [ 16 ] Kogure K, Simidu U, Taga N. Bacterial attachment to phytoplankton in sea water [ J ]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1981, **56**(2-3): 197-204.
- [ 17 ] 顾孔珍, 钱纯, 罗岳平. 用 R2A 培养基提高饮用水中细菌总数检出率 [ J ]. 净水技术, 2004, **23**(1): 42-44.  
Gu K Z, Qian C, Luo Y P. To improve the detection rate of total bacteria count using R2A cultural medium [ J ]. Water Purification Technology, 2004, **23**(1): 42-44.
- [ 18 ] 黄佳佳, 柳景青, 王薇, 等. 实际供水管网管材和余氯浓度对生物膜的影响 [ J ]. 科技通报, 2014, **30**(9): 216-222.  
Huang J J, Liu J Q, Wang W, *et al.* Effects of pipe materials and free chlorine on biofilm in drinking water distribution system [ J ]. Bulletin of Science and Technology, 2014, **30**(9): 216-222.
- [ 19 ] Li S P, Guo N, Wu H Y, *et al.* High efficient mixed culture screening and selected microbial community shift for bioleaching process [ J ]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, **21**(6): 1383-1387.
- [ 20 ] 余辉, 马丽丽, 毛冠男, 等. 饮用水微生物的安全快速检测 [ J ]. 微生物学通报, 2012, **39**(8): 1171-1178.  
Yu H, Ma L L, Mao G N, *et al.* Fast and safety detection of drinking water in respect of microbial quality [ J ]. Microbiology China, 2012, **39**(8): 1171-1178.
- [ 21 ] Zeng X D, Zhang X L, Yang W, *et al.* Fluorescence detection of adenosine triphosphate through an aptamer-molecular beacon multiple probe [ J ]. Analytical Biochemistry, 2012, **424**(1): 8-11.
- [ 22 ] 林怡雯, 杨天, 李丹, 等. 基于 CTC-流式细胞仪活性细菌总数的快速检测技术研究 [ J ]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2511-2515.  
Lin Y W, Yang T, Li D, *et al.* Rapid detection of viable bacteria by integrated CTC (5-Cyano-2, 3-ditoyl tetrazolium chloride) dyeing and flow cytometry assay (CTC-FCM) [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(9): 2511-2515.
- [ 23 ] 刘新星, 霍转转, 云慧, 等. 流式细胞术在细菌快速检测中的应用 [ J ]. 微生物学通报, 2014, **41**(1): 161-168.  
Liu X X, Huo Z Z, Yun H, *et al.* Application of flow cytometry to rapid detection of bacteria [ J ]. Microbiology China, 2014, **41**(1): 161-168.
- [ 24 ] 郑琦, 陈超, 张晓健, 等. 给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 [ J ]. 环境科学, 2013, **34**(2): 576-582.  
Zheng Q, Chen C, Zhang X J, *et al.* Inactivation of *Mycobacterium mucogenicum* in drinking water: chlorine resistance and mechanism analysis [ J ]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 576-582.
- [ 25 ] 王琳, 王宝贞. 饮用水深度处理技术 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [ 26 ] Lechevallier M W, Evans T M, Seidler R J. Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water [ J ]. Applied and Environmental Microbiology, 1981, **42**(1): 159-167.
- [ 27 ] Lehtola M J, Laxander M, Miettinen I T, *et al.* The effects of changing water flow velocity on the formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes [ J ]. Water Research, 2006, **40**(11): 2151-2160.

## CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing .....	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> ( 423 )
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China .....	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> ( 429 )
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Shengsi Region .....	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> ( 438 )
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM <sub>2.5</sub> from Mt. Taishan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> ( 445 )
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> ( 453 )
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> ( 461 )
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing .....	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> ( 469 )
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 .....	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> ( 476 )
Variation Analysis of Daily PM <sub>2.5</sub> Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou .....	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> ( 485 )
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing .....	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> ( 495 )
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong .....	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> ( 502 )
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations .....	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> ( 510 )
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century .....	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> ( 517 )
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> ( 527 )
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors .....	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> ( 535 )
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer .....	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> ( 547 )
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone .....	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> ( 555 )
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water .....	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> ( 563 )
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO .....	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> ( 572 )
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> ( 580 )
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants .....	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> ( 589 )
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> ( 600 )
Experimental Research of Hg <sup>2+</sup> Removal by TiO <sub>2</sub> /Bentonite Composite .....	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> ( 608 )
Impact of Ammonia and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> on Bromate and Disinfection By-products Control .....	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> ( 616 )
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks .....	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> ( 622 )
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite .....	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> ( 629 )
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 640 )
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes .....	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources .....	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 654 )
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System .....	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> ( 665 )
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance .....	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> ( 672 )
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge .....	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> ( 679 )
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i> .....	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> ( 688 )
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge .....	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 697 )
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City .....	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> ( 703 )
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China .....	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> ( 711 )
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes .....	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 721 )
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil .....	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> ( 728 )
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> ( 735 )
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment .....	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> ( 743 )
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas .....	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> ( 752 )
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils .....	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 760 )
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances .....	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> ( 769 )
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity .....	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> ( 783 )
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain .....	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 792 )
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics .....	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> ( 802 )
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain .....	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> ( 809 )
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat .....	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> ( 815 )
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat .....	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> ( 825 )
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure .....	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> ( 832 )
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures .....	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei ( 837 )

# 《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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172