

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
蓝藻腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

3 种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响

吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫*

(中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 本文研究了消毒副产物对细菌抗生素抗性的作用. 分别选取三卤甲烷类 (THMs)、卤乙酸类 (HAAs) 以及醛类消毒副产物中典型物质—氯二溴甲烷 (CDBM)、碘乙酸 (IAA) 和水合三氯乙醛 (CH), 研究了细菌经消毒副产物染毒之后, 对多种抗生素的抗性变化情况. 结果发现, 3 种消毒副产物均可以诱导野生型铜绿假单胞菌提高对 5 种受试抗生素的抗性, 提高作用 $IAA > CH > CDBM$. IAA 对多重抗性也具有一定的提高作用. 野生型大肠杆菌的抗生素抗性同样能够被 DBPs 诱导提高, 说明 DBPs 对抗性的影响具有普遍性. 其作用机制可能是 DBPs 通过氧化胁迫机制诱导细菌发生突变, 进而提高细菌抗生素抗性. 本研究表明饮用水系统中部分细菌抗生素抗性的获得可能与消毒副产物有关; 除毒理学风险外, 消毒副产物的流行病学风险同样不容忽视.

关键词: 消毒副产物; 抗生素抗性; 基因突变; 三卤甲烷; 卤乙酸; 醛类

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2525-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.027

Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance

LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, LIN Hui-rong, YU Xin*

(Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: The effect of typical disinfection byproducts (DBPs) on bacterial antibiotic resistance was investigated in this study. chlorodibromomethane (CDBM), iodoacetic acid (IAA) and chloral hydrate (CH) were selected, which belong to trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAAs) and aldehydes, respectively. After exposure to the selected DBPs, the resistance change of the tested strains to antibiotics was determined. As a result, all of the three DBPs induced *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 to gain increased resistance to the five antibiotics tested, and the DBPs ranked as $IAA > CH > CDBM$ according to their enhancement effects. Multidrug resistance could also be enhanced by treatment with IAA. The same result was observed in *Escherichia coli* K12, suggesting that the effect of DBPs on antibiotic resistance was a common phenomenon. The mechanism was probably that DBPs stimulated oxidative stress, which induced mutagenesis. And the antibiotic resistance mutation frequency could be increased along with mutagenesis. This study revealed that the acquisition of bacterial antibiotic resistance might be related to DBPs in drinking water systems. Besides the genotoxicological risks, the epidemiological risks of DBPs should not be overlooked.

Key words: disinfection byproducts (DBPs); antibiotic resistance; gene mutagenesis; trihalomethanes (THMs); haloacetic acids (HAAs); aldehydes

自 1970 年代 Rook^[1] 和 Bellar 等^[2] 发现饮用水消毒工艺会生成氯仿等消毒副产物 (disinfection byproducts, DBPs) 以来, 已有多达千余种 DBPs 在饮用水中被检出^[3]. 其中相当多的 DBPs 具有致癌、致畸、致突变的“三致”作用^[4, 5]. 国际上主要的饮用水水质标准都对其在饮用水中的水平进行了限定. 我国 2006 年颁布的 GB 5749-2006《生活饮用水卫生标准》(我国标准) 中也对 THMs、HAAs、醛类等十余种有机 DBPs 和溴酸盐、亚氯酸盐等无机 DBPs 的限值做了规定. 目前相关的毒理学研究多关注于 DBPs 对人类健康的直接影响, 如长期饮用罹患癌症的风险等^[6, 7]; 但对于其与饮用水中细菌接触, 对后者的毒理学效应则关注很少. 有研究表明, 市政管网水中的抗生素抗性细菌以及抗性基因的数量相较于出厂水有一定的提高^[8]. 笔者认为,

这可能与 DBPs 对细菌的作用有关.

细菌抗生素抗性 (bacterial antibiotic resistance) 会给医疗救治造成很大困难, 严重威胁人类健康. 其在包括饮用水在内的各种环境介质中的存在和传播已经引起广泛关注^[9, 10]. 一般认为基因突变是细菌产生抗性的根本原因^[11]. 致突变性 DBPs 会与配水管网中的微生物有几天甚至更长时间的接触, 可能诱导部分细菌发生突变; 而基于突变的不定向性, 其中一些突变可能使细菌获得抗性. 本研究将选取 3 种典型 DBPs, 包括已纳入我国标准的一氯二溴甲烷

收稿日期: 2014-12-20; 修订日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278482, 21407141, 31300109); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA062607)

作者简介: 吕露 (1987 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为饮用水水质安全评价及其理论与方法, E-mail: llv@ iue. ac. cn

* 通讯联系人, E-mail: xyu@ iue. ac. cn

(chlorodibromomethane, CDBM) 和水合三氯乙醛 (chloral hydrate, CH), 以及一种新兴碘代 DBP 碘乙酸 (iodoacetic acid, IAA), 分析细菌暴露于这 3 种物质之后, 对抗生素的抗性变化情况, 以期更加全面地了解 DBPs 的毒理学风险和对人类健康的威胁.

1 材料与方法

1.1 试剂

消毒副产物标准样品碘乙酸 (IAA)、水合三氯

乙醛 (CH) 以及一氯二溴甲烷 (CDBM) 均购自 Sigma 公司 (U. S. A.), 其主要化学性质见表 1.

所试抗生素, 庆大霉素 (gentamicin, Gen)、多粘菌素 (polymycin B, Pol) 以及四环素 (tetracycline, Tet) 购自 Solarbio 公司; 环丙沙星 (ciprofloxacin, Cip) 购自 LKT Laboratories (U. S. A.); 利福平 (Rifampin, Rif) 购自 Sigma 公司 (U. S. A.).

1.2 菌株及培养基

实验菌株: 铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas*

表 1 所选 DBPs 的主要化学性质

Table 1 Main chemical properties of the selected DBPs					
名称	缩略词	分子式	CAS 号	消毒	水中质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
碘乙酸	IAA	$\text{C}_2\text{H}_3\text{IO}_2$	64-69-7	氯胺	0.1 ~ 10
水合三氯乙醛	CH	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3\text{O}_2$	302-17-0	氯, 氯胺	~ 10
一氯二溴甲烷	CDBM	CHBr_2Cl	124-48-1	氯, 氯胺	~ 10

aeruginosa) PAO1 (野生型), 由厦门大学海洋与 Environment 学院惠赠; 大肠杆菌 (*Escherichia coli*) K12 (野生型), 由本所环境生物技术研究组惠赠.

培养基: LB 肉汤及 LB 固体培养基为青岛海博生物技术有限公司产品.

1.3 暴露实验及抗性检测

P. aeruginosa PAO1 活化 15 h 后, 稀释 500 倍至含有 DBPs 的 5 mL LB 肉汤中接触染毒, 37℃ 下振荡培养 24 h. DBPs 的染毒质量浓度分别为, IAA: 10、20、40、80、160 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; CH: 150、300、450、600、900 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; CDBM: 600、1 200、2 400、3 600、4 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 且以相同量溶剂做空白对照,

记为 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

将染毒菌液用生理盐水梯度稀释后, 涂布至 LB 平板, 以测定染毒后活菌总数; 另外, 将染毒菌液用生理盐水稀释 10 倍后, 涂布至含有一定剂量抗生素的 LB 平板 (具体抗生素质量浓度见表 2), 以测定染毒后细菌的抗生素抗性. 每个菌液梯度 3 个平行. 所有平板 37℃ 培养 48 h 后, 进行菌落计数.

以 *E. coli* K12 为受试菌株时, 操作与 *P. aeruginosa* PAO1 基本相同. 由于不同细菌对 DBPs 的敏感度不同, IAA 染毒质量浓度调整为: 10、20、40、60、80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 染毒后菌液用生理盐水稀释 5 倍后, 测定细菌抗生素抗性 (具体抗生素质量浓度见表 2).

表 2 平板中抗生素质量浓度

Table 2 Antibiotic concentrations in LB agar				
抗生素	缩略语	类别	质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	
			<i>P. aeruginosa</i> PAO1	<i>E. coli</i> K12
环丙沙星	Cip	氟喹诺酮类	0.234	—
庆大霉素	Gen	氨基糖苷类	13.2	9.60
多粘菌素	Pol	多肽类	3.16	—
利福平	Rif	利福平类	29.6	—
四环素	Tet	四环素类	33.0	6.40
环丙沙星 + 四环素	Cip + Tet	—	0.234 + 33.0	—

1.4 数据分析

由于 LB 平板中抗生素质量浓度高于该种抗生素对细菌的最小抑制浓度 (minimum inhibitory concentrations, MICs), 因此抗生素平板中生长出的菌落被认为具有相应抗生素的抗性. 因此, 根据抗生素平板、LB 平板上的菌落数以及相应的稀释倍数, 可以计算出染毒后菌液中的抗性菌数量以及活菌总数. 抗生素抗性突变频率 (mutation frequency)

等于抗性菌数量除以活菌总数.

细菌存在自发突变, 突变频率约为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$, 因此空白对照的抗性突变频率大于 0. 为了更清晰地表现 DBPs 对抗性的影响作用, 将空白对照的突变频率定义为 1, 最终结果以实验组突变频率相对于空白对照的“突变频率变化倍数”来表征. 每组染毒实验重复 3 次.

用独立样本 *t* 检验对实验组与空白对照的突变

频率变化倍数进行显著性检验 (SPSS 15.0 软件), $P < 0.05$ 即存在显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 DBPs 对细菌抗生素抗性的影响

3 种 DBPs 均由目前常用的氯、氯胺消毒产生, 分属于饮用水中存在最广泛的 THMs、HAAs 以及醛类 DBPs^[12]。IAA 以及 CDBM 的生成量与原水中碘浓度、溴浓度呈相关性; 当处理工艺中包括臭氧预处理时, 氯或氯胺后消毒后 CH 生成量会提高^[13]。我国标准对 CDBM 规定限值为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CH 为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 未对 IAA 做出规定, 但同类 DBPs 规定了二氯乙酸 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、三氯乙酸 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。前人的研究结果证实了所试 3 种 DBPs 均具有不同程度的致突变性。尽管 IAA 在饮用水中质量浓度甚至低于 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平, 但其遗传毒性在碘代酸中最大, 强于其它卤乙酸, 甚至还超过了强致突变物 3-氯-4-(二氯甲基)-5-羟基-2(5H)-呋喃酮 (MX)^[14]。Plewa 等^[15] 研究表明, IAA 可诱导 *Salmonella typhimurium* TA100 菌株回复突变率达 $14\ 129$ 回变菌落数 $\cdot \mu\text{mol}^{-1}$, 在中国仓鼠卵巢细胞 (CHO) 单细胞凝胶电泳实验中遗传毒性潜能为 $1.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。CH 是直接致突变物, 可以诱导细菌

发生碱基置换突变。Liviak 等^[16] 的彗星实验结果显示 $82.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CH 相对于对照具有显著的遗传毒性。Yasunaga 等^[17] 研究发现 $5\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CDBM 在未加 S9 的 umu test 中显示致突变阳性结果。

本研究主要目的是考察 3 种典型 DBPs 对细菌抗生素抗性的作用, 因此获得足够多的抗性突变株对定量分析减小误差是必要的。根据我国标准规定, 饮用水中菌落总数应不高于 $100 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。在这样的细菌水平下, 考虑到细菌自发突变频率约为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$, 即使 DBPs 对抗性突变频率有提高作用, 也无法保证这一作用达到可检测的程度。因此, 实验菌株需要在肉汤中培养以获得足够多的突变株。在毒理学试验中, 有毒物质的暴露剂量通常是指单位生物量的暴露浓度, 比如小鼠试验中常用 “ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以毒物/体重计” 表征毒物剂量^[18]。为了尽量体现实际饮用水系统中单位生物量的暴露剂量, 本研究中 DBPs 的质量浓度也随菌液浓度而相应地提高到 $10^2 \sim 10^3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平。

经 DBPs 染毒 24 h 之后, *P. aeruginosa* PAO1 以及 *E. coli* K12 菌液活菌浓度见图 1。 *P. aeruginosa* PAO1 的活菌浓度随 DBPs 染毒浓度而提高, CH 提高作用最显著, 最大为 2.01 倍; *E. coli* K12 活菌浓

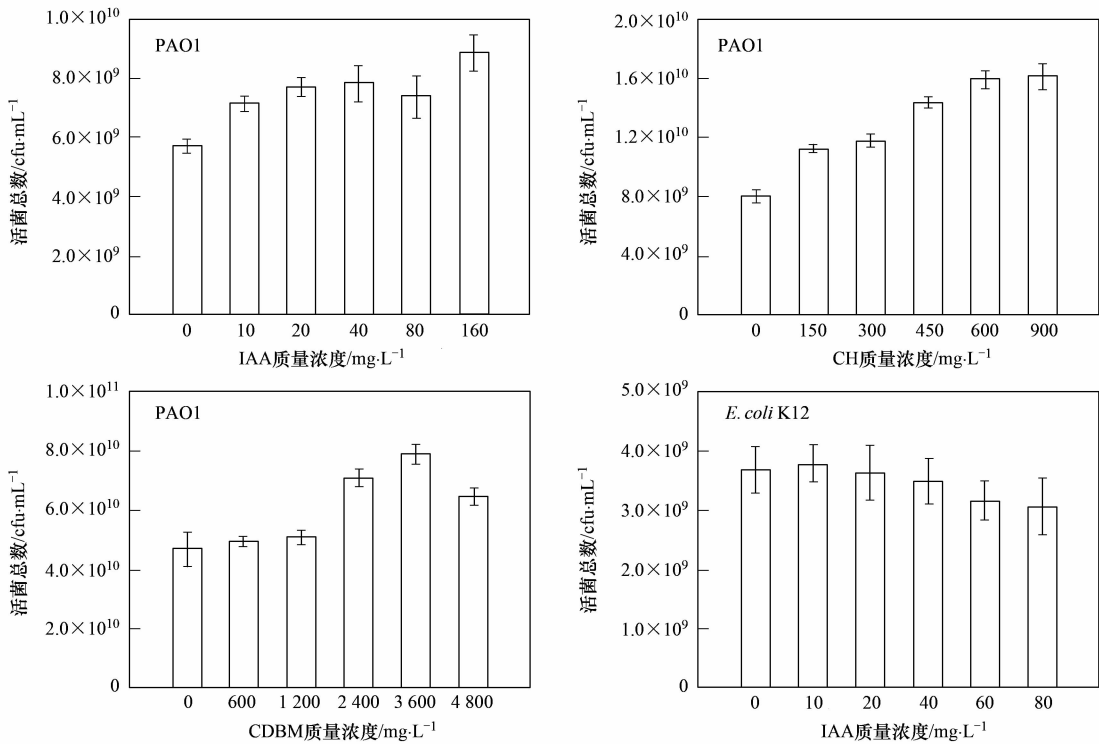


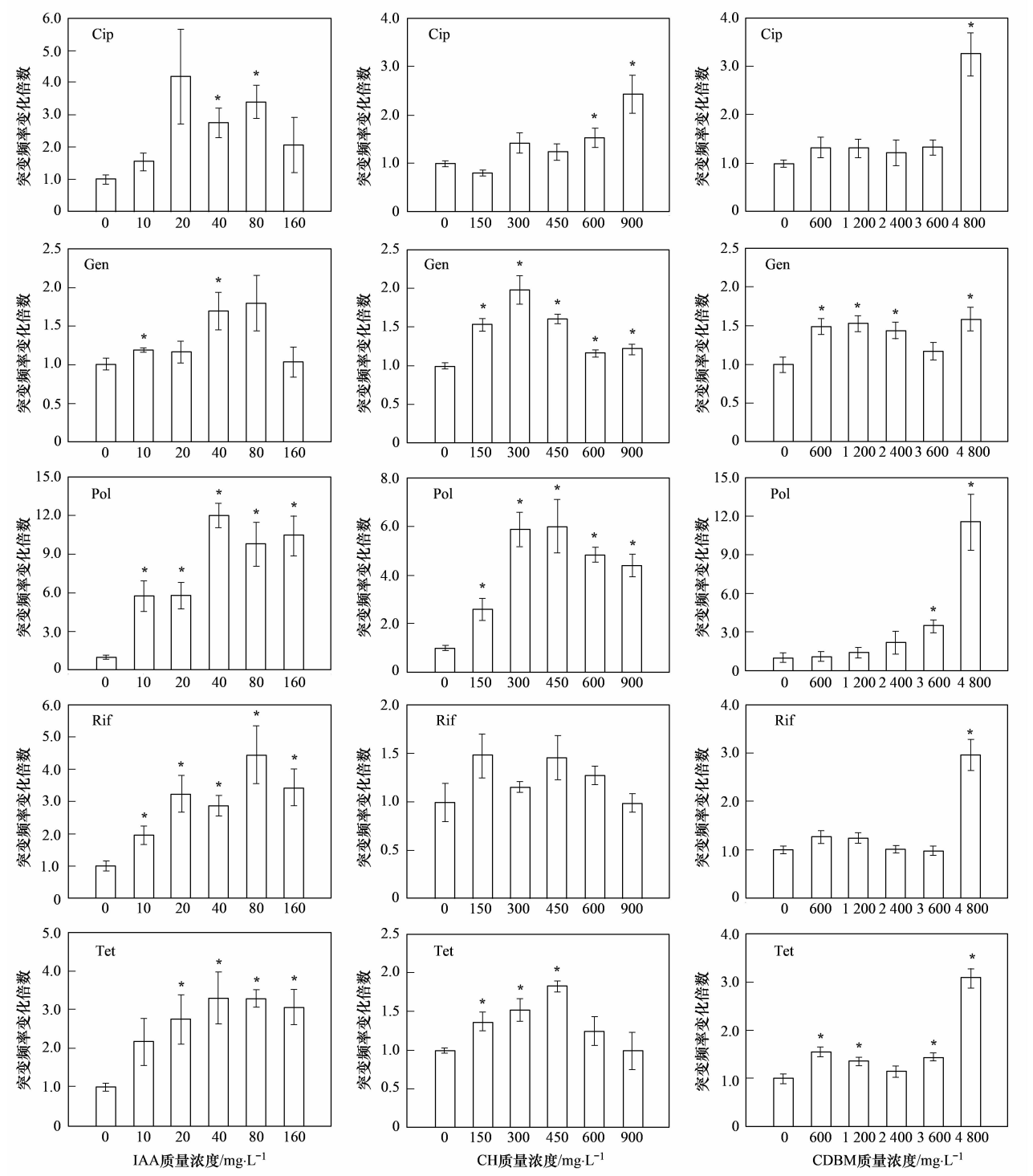
图 1 染毒后两种受试菌株活菌浓度

Fig. 1 Total counts of culturable bacteria after exposure to DBPs

度则有一定程度的下降,尤其 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ IAA 染毒后菌液浓度下降较明显. 该结果说明,3 种 DBPs 对 *P. aeruginosa* PAO1 无生理毒性,甚至可以作为部分碳源被加以利用;而高浓度 IAA 对 *E. coli* K12 有一定生理毒性.

2.1.1 典型 DBPs 对 *P. aeruginosa* PAO1 单一抗生素抗性的影响

暴露于 IAA 之后,*P. aeruginosa* PAO1 对 5 种不同种类抗生素的抗性均有不同程度的提高(见图 2). Pol 抗性最大可提高 12.01 倍; Cip、Rif 以及



* 表示差异显著,下同

图 2 3 种 DBPs 对 *P. aeruginosa* PAO1 抗生素抗性的影响

Fig. 2 Effect of three selected DBPs on the antibiotic resistance of *P. aeruginosa* PAO1

Tet 抗性普遍提高 3~4 倍；Gen 抗性受 IAA 影响较小,80 mg·L⁻¹ 的 IAA 染毒后细菌抗性突变频率是空白对照的 1.80 倍。作用效果最显著的 IAA 染毒浓度,不是最大剂量 160 mg·L⁻¹,而是 40 mg·L⁻¹、80 mg·L⁻¹。这种在所试染毒浓度范围内,低剂量对抗生素抗性的提高作用强于高剂量的现象,符合毒物兴奋效应剂量-反应关系^[19]。

CH 的染毒作用同样诱导 *P. aeruginosa* PAO1 提高了对 5 种抗生素的抗性,Cip、Gen、Pol、Rif、和 Tet 抗性分别提高了 2.43、1.98、6.01、1.48 和 1.82 倍；且对抗性的提高作用最强的剂量主要集中在 150~450 mg·L⁻¹,该现象与 IAA 的作用效果相似。根据图 1,CH 在某种程度上可以作为 *P. aeruginosa* PAO1 的碳源加以利用,促进细菌生长。因此,被诱导出的抗性细菌会存在再生长现象,有可能加剧管网环境中细菌抗生素抗性问题的严峻性。

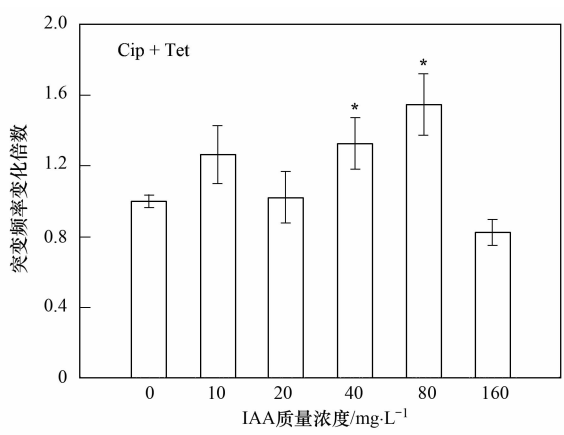
CDBM 对除 Gen 之外的所试抗生素抗性的提高作用效果基本一致,即:低剂量 CDBM 对抗性的影响不大,4 800 mg·L⁻¹ 的 CDBM 对抗性有显著提高作用。4 800 mg·L⁻¹ 的 CDBM 染毒之后,Pol 抗性提高 11.52 倍；Cip、Rif 及 Tet 抗性提高 3 倍左右；Gen 抗性则提高 1.59 倍。4 800 mg·L⁻¹ 的 CDBM 对 5 种抗生素抗性的提高效果与 40~80 mg·L⁻¹ 的 IAA 基本一致,因此 IAA 对 *P. aeruginosa* PAO1 的抗生素抗性提高作用潜力是 CDBM 的 60~120 倍左右。

综合考虑 3 种 DBPs 对细菌抗生素抗性的作用以及染毒浓度,可以发现,以单位 DBPs 质量浓度计算,IAA 对抗性的影响最大,其次是 CH, CDBM 作用最小。DBPs 对抗性的提高作用结果与已报道的 DBPs 致突变性大小是一致的。碘代 DBPs 的致突变性远远强于溴代以及氯代 DBPs,Plewa 等^[15] 研究证明 IAA 对 *S. typhimurium* TA100 菌株的致突变性分别是溴乙酸和氯乙酸的 2.6 倍和 523.3 倍。且卤代醛类 DBPs 的致突变性强于卤代甲烷类 DBPs^[20]。相对于同一种抗生素,3 种 DBPs 对其抗性的最大提高效果都比较相近,说明 3 种 DBPs 对 *P. aeruginosa* PAO1 的作用机制可能相似。比较 5 种不同类型抗生素,根据其抗性被提高的平均值排序,由强到弱分别是 Pol(9.85 倍)、Cip(3.30 倍)、Rif(2.96 倍)、Tet(2.74 倍)以及 Gen(1.79 倍)。因此,所试 3 种 DBPs 均可以诱导 *P. aeruginosa* PAO1 对 5 种抗生素的抗性提高。

2.1.2 IAA 对 *P. aeruginosa* PAO1 多重抗性的影响

另外,本研究以 IAA 为例,通过将染毒后菌液

涂布至同时含有 Cip、Tet 两种抗生素的固体培养基中,考察 *P. aeruginosa* PAO1 染毒后对多重抗生素抗性的变化,结果见图 3。暴露于 IAA 之后,*P. aeruginosa* PAO1 对 Cip + Tet 多重抗生素抗性相对于空白对照,同样有一定提高。80 mg·L⁻¹ IAA 的效果最显著,为 1.55 倍。Cip 与 Tet 的抗性获得,既有各自特异性的机制,如抗生素失活或靶位点变化等；也共享相同的机制,如外排等。据报道,*P. aeruginosa* PAO1 可通过 MexAB-OprM、MexCD-OprJ 以及 MexXY-OprM 等外排泵将 Cip 以及 Tet 排出胞外而获得对两种抗生素的抗性^[21]。本研究中,IAA 诱导 *P. aeruginosa* PAO1 同时对 Cip 与 Tet 两种抗生素抗性的提高,可能是由于 IAA 染毒引起细菌外排作用增强而造成的。虽然 IAA 对多重抗性提高的作用小于单一抗性,但会导致多重抗性细菌流行性增加,另外可能通过水平基因转移大大增加致病菌中携带多重抗性基因的风险。



IAA 质量浓度 / mg·L ⁻¹	突变频率变化倍数
0	1.00
10	1.25
20	1.05
40	1.30*
80	1.55*
160	0.85

2.1.3 IAA 对 *E. coli* K12 抗生素抗性的影响

IAA 也能够提高 *E. coli* K12 对抗生素的抗性(图 4)。提高作用最为显著的 IAA 染毒剂量同样是 40~80 mg·L⁻¹,其剂量-反应关系与 IAA 对 *P. aeruginosa* PAO1 抗性作用效果一致。Tet 抗性最大提高 3.54 倍,与 *P. aeruginosa* PAO1 相当；而 Gen 抗性提高 5.59 倍,远高于 3 种 DBPs 对 *P. aeruginosa* PAO1 的作用。*P. aeruginosa* 是广泛存在于环境中的条件致病菌^[22],而 *E. coli* 是水环境中常用的病原微生物指示菌^[23]。本研究表明 DBPs 染毒能够提高两种细菌对多种抗生素的抗性,因此 DBPs 对环境其他细菌甚至是致病菌也应该具有同样的诱导作用。

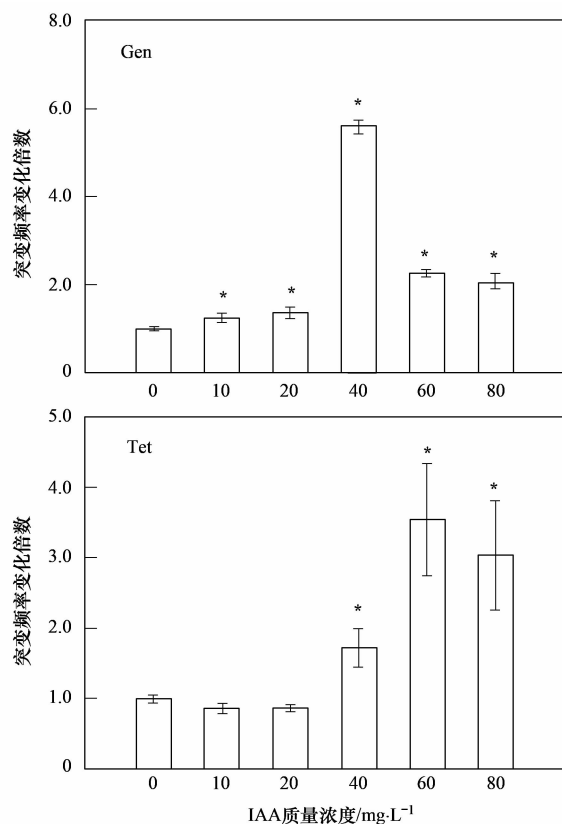


图 4 IAA 对 *E. coli* K12 抗生素抗性的影响

Fig. 4 Effect of IAA on the antibiotic resistance of *E. coli* K12

2.2 作用机制分析

上述实验结果证明了典型 DBPs 能够诱导细菌的抗生素抗性甚至多重抗性的提高。DBPs 可以通过氧化胁迫作用使细菌等受试物发生基因突变。Cemeli 等^[24]通过在 IAA 对 *S. typhimurium* TA100 以及 CHO 的暴露实验中加入抗氧化剂过氧化氢酶以及叔丁基羟基茴香醚 (BHA), 证实 IAA 通过氧化胁迫机制诱发其致突变性和遗传毒性。Yuan 等^[25]通过小鼠体内实验, 发现 MX 同样通过氧化胁迫机制导致对小鼠的 DNA 损伤。因此, DBPs 诱导细菌抗性提高的机制可能是 DBPs 通过氧化胁迫机制诱导细菌发生基因突变, 抗性突变频率将伴随总突变频率而提高。作者之前的工作通过消毒副产物 MX 以及二氯乙腈 (DCAN) 对 PAO1 暴露实验中加入羟基自由基猝灭剂硫脲 (TU), 证明 DBPs 诱导抗生素抗性提高与活性氧物质 (ROS) 的产生有关; 且通过对抗性相关基因的测序比对, 证实基因突变导致了抗生素抗性的提高^[26]。

2.3 实际意义

本研究选取的 3 种 DBPs 在饮用水中含量较高, 且两种已被纳入国家饮用水卫生标准。但其致

突变性, 尤其是 CH 和 CDBM, 相较于其他 DBPs 如含氮消毒副产物 (N-DBPs) 较弱, 因此其它 DBPs 可能也对抗性有提高, 甚至作用更高。而在饮用水系统中, 多种 DBPs 混合作用于环境菌株, 对抗生素抗性的诱导作用可能会更强烈, 所带来的健康风险不容忽视。因此, 对于 DBPs, 除了关注其遗传毒性外, 其对细菌的生态毒理学效应也应该引起重视, 要从化学安全和生物安全两方面对 DBPs 展开更全面的研究。另外, 本研究所试 DBPs 均是氯消毒以及氯胺消毒后的副产物, 建议水厂应该从生物安全角度采用更加安全的消毒工艺。

3 结论

本文研究了 3 种典型 DBPs 对常见条件病原微生物 *P. aeruginosa* 和病原微生物指示菌 *E. coli* 的抗生素抗性的影响。经 DBPs 染毒后, 受试菌对多种抗生素的单一抗性 & 多重抗性均有不同程度的提高, 单一抗性提高倍数在 1.48 ~ 12.01 之间, 多重抗性可提高 1.55 倍。典型 DBPs 对抗性的提高作用具有一定的普遍性。3 种 DBPs 对抗性的提高作用与其致突变性强弱正相关, 其作用机制可能是通过氧化胁迫作用诱发细菌的抗性基因突变, 从而使细菌产生抗性。

参考文献:

- [1] Rook J J. Formation of haloforms during chlorination of natural waters[J]. Water Treatment and Examination, 1974, **23**: 234-243.
- [2] Bellar T A, Lichtenberg J J, Kroner R C. The occurrence of organohalides in chlorinated drinking waters [J]. Journal American Water Works Association, 1974, **66**(12): 703-706.
- [3] Zhang H F, Zhang Y H, Shi Q, et al. Study on transformation of natural organic matter in source water during chlorination and its chlorinated products using ultrahigh resolution mass spectrometry [J]. Environmental Science and Technology, 2012, **46**(8): 4396-4402.
- [4] Vartiainen T, Liimatainen A. High levels of mutagenic activity in chlorinated drinking water in Finland [J]. Mutation Research/Genetic Toxicology, 1986, **169**(1-2): 29-34.
- [5] Plewa M J, Kargalioglu Y, Vankerk D, et al. Mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity analysis of drinking water disinfection by-products [J]. Environmental and Molecular Mutagenesis, 2002, **40**(2): 134-142.
- [6] Kogevinas M, Villanueva C M. Carcinogenicity of disinfection byproducts in humans: epidemiological studies, in encyclopedia of environmental health[M]. Burlington: Elsevier, 2011. 505-515.
- [7] 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 等. J 市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3474-3479.

- [8] Xi C W, Zhang Y L, Marrs C F, *et al.* Prevalence of antibiotic resistance in drinking water treatment and distribution systems [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(17): 5714-5718.
- [9] 梁惜梅, 聂湘平, 施震. 珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 4073-4080.
- [10] 黄福义, 李虎, 韦蓓, 等. 长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3869-3873.
- [11] Dwyer D J, Kohanski M A, Collins J J. Role of reactive oxygen species in antibiotic action and resistance [J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2009, **12**(5): 482-489.
- [12] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [13] Richardson S D, Plewa M J, Wagner E D, *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2007, **636**(1-3): 178-242.
- [14] Plewa M J, Wagner E D, Muellner M G, *et al.* Comparative mammalian cell toxicity of N-DBPs and C-DBPs, in disinfection by-products in drinking water [M]. American Chemical Society, 2008. 36-50.
- [15] Plewa M J, Wagner E D, Richardson S D, *et al.* Chemical and biological characterization of newly discovered iodoacid drinking water disinfection byproducts [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(18): 4713-4722.
- [16] Liviak D, Creus A, Marcos R. DNA damage induction by two halogenated acetaldehydes, byproducts of water disinfection [J]. *Water Research*, 2010, **44**(8): 2638-2646.
- [17] Yasunaga K, Kiyonari A, Oikawa T, *et al.* Evaluation of the *Salmonella* umu test with 83 NTP chemicals [J]. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2004, **44**(4): 329-345.
- [18] Komulainen H, Kosma V M, Vaittinen S L, *et al.* Carcinogenicity of the drinking water mutagen 3-chloro- 4-(dichloromethyl)- 5-hydroxy- 2 (5H)-furanone in the rat [J]. *Journal of the National Cancer Institute*, 1997, **89**(12): 848-856.
- [19] Calabrese E J, Stanek III E J, Nascarella M A. Evidence for hormesis in mutagenicity dose-response relationships [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2011, **726**(2): 91-97.
- [20] Plewa M J, Wagner E D. Quantitative comparative mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity of selected classes of drinking water disinfection by-products [R]. Denver, CO: Water Research Foundation, 2009.
- [21] Schweizer H P. Efflux as a mechanism of resistance to antimicrobials in *Pseudomonas aeruginosa* and related bacteria: unanswered questions [J]. *Genetics and Molecular Research*, 2003, **2**(1): 48-62.
- [22] Stover C K, Pham X Q, Erwin A L, *et al.* Complete genome sequence of *Pseudomonas aeruginosa* PAO1, an opportunistic pathogen [J]. *Nature*, 2000, **406**(6799): 959-964.
- [23] Percival S L, Williams D W. Chapter Six-*Escherichia coli*, in microbiology of waterborne diseases [M]. (Second Edition). London: Academic Press, 2014. 89-117.
- [24] Cemeli E, Wagner E D, Anderson D, *et al.* Modulation of the cytotoxicity and genotoxicity of the drinking water disinfection byproduct iodoacetic acid by suppressors of oxidative stress [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(6): 1878-1883.
- [25] Yuan J, Liu H, Zhou L H, *et al.* Oxidative stress and DNA damage induced by a drinking-water chlorination disinfection byproduct 3-chloro- 4-(dichloromethyl)- 5-hydroxy- 2 (5H)-furanone (MX) in mice [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2006, **609**(2): 129-136.
- [26] Lv L, Jiang T, Zhang S H, *et al.* Exposure to mutagenic disinfection byproducts leads to increase of antibiotic resistance in *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, **48**(14): 8188-8195.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行