

技术总结

生活饮用水和瓶装饮用水的细菌内毒素活性调查

张 灿^{1,2,3}, 刘文君¹, 张明露^{1,4}, 田 芳¹, 李翠萍¹, 顾军农⁵,
钱令嘉³, 孙 雯⁶, 杲修杰^{2,3}

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 军事医学科学院 卫生学环境医学研究所, 天津 300050; 3. 军事医学科学院 基础医学研究所, 北京 100850; 4. 北京工商大学 食品学院, 北京 100048; 5. 北京市自来水集团水质监测中心, 北京 100192; 6. 首都医科大学附属友谊医院 泌尿外科, 北京 100050)

摘 要: 2012 年 4 月—5 月对北京市城市生活饮用水和市售瓶装饮用水进行样品采集, 采用动态浊度法试验定量检测内毒素活性。北京市 3 个水源水的内毒素范围为 21.3 ~ 68.2 EU/mL。北京市 A 水厂进、出水内毒素分别为 11.2、4.1 EU/mL, 水厂的整个处理流程对内毒素的去除率达 63%; 此外, A 水厂的出水中均未检出异养菌和菌落总数(平板计数), 说明水厂处理流程对水中微生物的控制效果有效。北京市城区 12 个管网末梢水的内毒素范围为 0.1 ~ 9.1 EU/mL。市售的 9 种瓶装饮用水内毒素范围为 (<0.004) ~ 16.0 EU/mL。与国外相关报道相比, 北京市水源水、水厂进出水和管网末梢水中内毒素范围明显偏低, 瓶装饮用水中内毒素污染水平和国外相关报道基本一致。

关键词: 饮用水; 内毒素; 水源; 管网末梢水; 瓶装水

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2013)13-0047-06

Investigation on Bacterial Endotoxin Activities in Municipal Drinking Water and Bottled Drinking Water

ZHANG Can^{1,2,3}, LIU Wen-jun¹, ZHANG Ming-lu^{1,4}, TIAN Fang¹, LI Cui-ping¹,
GU Jun-nong⁵, QIAN Ling-jia³, SUN Wen⁶, GAO Xiu-jie^{2,3}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Hygiene and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050, China; 3. Institute of Basic Medicine Sciences, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850, China; 4. School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 5. Water Quality Monitoring Center, Beijing Waterworks Group, Beijing 100192, China; 6. Department of Urology, Affiliated Beijing Friendship Hospital of Capital Medical University, Beijing 100050, China)

Abstract: Bacterial endotoxin activities in samples of municipal drinking water and bottled drinking water in April and May of 2012 in Beijing were detected using kinetic turbidimetric *Limulus* test. En-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978142); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404002)

dotoxin activities in three source waters for Beijing were in the range of 21.3 to 68.2 EU/mL. The endotoxin activities in the influent and the effluent of the WTP A were 11.2 EU/mL and 4.1 EU/mL, respectively, and the removal rate was 63%. In addition, the HPC and the bacterial count by plate count were not detected, demonstrating that the treatment process in WTP A was efficient in controlling microbial contamination. Endotoxins activities were in range of 0.1 to 9.1 EU/mL in 12 samples of the tap water, and <0.004 to 16.0 EU/mL in 9 samples of the bottled water. Compared with the results in foreign literature, endotoxin activities were notably low in source water, the influent and effluent of WTP and Beijing's tap water, and agreed with related reports on bottled drinking water.

Key words: drinking water; endotoxin; water source; tap water; bottled water

内毒素, 又称脂多糖, 是革兰氏阴性菌和部分蓝藻的细胞壁成分, 主要由菌体死亡解体时释放。内毒素进入血液可以和 CD14、TLR-4 和 MD-2 等结合后促进机体释放肿瘤坏死因子 (TNF) 和白介素 (IL) 等细胞因子, 诱发发热、哮喘、慢性炎症、低血压, 甚至导致多器官的衰竭和机体死亡^[1-2]。内毒素具有极强的耐热性 (100 °C 高温下加热 1 h 仍无法灭活), 160 °C 下加热 2~4 h, 或用强碱、强酸或强氧化剂加热煮沸 30 min 才能破坏它的生物活性, 因此常规消毒措施和水处理工艺不易将其去除。由于内毒素是外源性致热原, 机体反应极为敏感, Elin 报道 0.1~0.5 ng/kg 内毒素进行体内注射可引起人体的发热反应^[3]。因此, 血液透析用水、制药用水等医疗用水由于直接与人体血液接触, 其中的内毒素活性最早得到关注并已经严格控制。目前我国 2005 年发布的《血液透析和相关治疗用水》(YY 0572-2005) 规定内毒素限值为 1 EU/mL, 我国药典规定制药用水的内毒素为 0.25 EU/mL^[4]。虽然目前国内外尚没有将内毒素列入饮用水水质标准, 世界卫生组织 (WHO) 也没有规定饮用水中内毒素的限值, 但是国外研究中已经开始关注饮用水的内毒素污染通过饮用、呼吸暴露途径引起的机体健康风险, 饮用水的内毒素污染报道也逐年增多。

细菌内毒素在水体中存在形态分为游离态内毒素和结合态内毒素两种^[5]。游离态内毒素指以溶解状态在水中游离存在的内毒素分子。结合态内毒素会受到水中悬浮颗粒物、细菌总数和蓝藻数量等多种参数的影响, 主要分为以下 3 类: ①当细菌或者蓝藻死亡后, 与菌体残体相连的内毒素分子; ②附着在水中悬浮颗粒物表面的内毒素; ③由于内毒素分子具有两亲性, 容易聚集成团从而形成体积较大的内毒素聚集体等。游离态内毒素和结合态内毒素都

具有内毒素活性, 但是水体流速和流态对内毒素的存在形态产生影响, 而且不同的水处理工艺会对不同形态内毒素的控制效果产生差异。笔者对北京市城市生活饮用水 (水源水、水厂进水和管网末梢水) 和市售瓶装饮用水的内毒素污染水平进行调查, 分析了不同形态内毒素所占比例, 并和国外相关报道进行了对比和分析。

1 试验材料与方法

1.1 玻璃器皿

无热原稀释试管 (15×100 mm)、无热原反应试管 (8×75 mm) 和无热原移液器吸头。其他玻璃器皿经铬酸浸泡 24 h, 热自来水冲洗, 无热原的高纯水 (<0.02 EU/mL) 冲洗, 马福炉 (350~400 °C) 干烘 2 h 去除热原。

1.2 仪器与试剂

内毒素活性的定量检测采用 ATI320-06 动态试管仪及配套软件; pH 值采用酸度计测定; 余氯采用 HACH 便携式余氯仪测定。

试剂: 动态浊度法鲎试剂 (Lot1011263, 灵敏度为 0.005 EU/mL)、无热原的细菌内毒素检查用水 (<0.003 EU/mL)、无热原 Tris-HCl 缓冲液 (pH 值=7.4)、内毒素工作标准品 (Control Standard Endotoxin, 简称 CSE, lot150601, 90 EU/支)、硫代硫酸钠 (分析纯)、R2A 培养基、营养琼脂、SYBR Green I、DMSO。

1.3 水样采集

在 2012 年 4 月—5 月对北京市水源水、水厂进水和管网末梢水进行采样。采集北京市 3 个地表水样品, 采样地点分别为密云水库、河北水库和某引水渠。本研究中河北水库的采集水样为河北省黄壁庄水库和岗南水库的汇流, 某引水渠的取样点是位于北京市北五环外的输水明渠。采集北京市 A 水

厂的进水和出水,该水厂以地表水为水源,处理能力达 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,达到北京市区供水量的 60%,水厂主要处理工艺为絮凝、沉淀、煤砂滤池、活性炭吸附和氯消毒。采集北京城区的管网末梢水样 12 个,取样地点包括朝阳区、海淀区、东城区、西城区、石景山区、丰台区,共涵盖北京市 6 个水厂的管网末梢水,其中 6[#]和 7[#]水样是 A 水厂的管网末梢水。选择 9 种市售瓶装饮用水,来自国内 9 个不同生产企业,产品包装完好并且在保质期内。玻璃采样瓶均为无热原玻璃器皿,采样结束后,运输途中的水样需要低温(4℃)保存,到达实验室后立刻进行样品测试。

1.4 水样预处理

水厂出水、管网末梢水样中含有的余氯会干扰内毒素测试结果,需要先投加 0.01% 的硫代硫酸钠来淬灭水中余氯。此外,水源水进入水厂之前会经过水质调节和预处理,为防止水厂进水中含有预氧化药剂对内毒素测试的干扰,也需要在水厂进水中投加 0.01% 的硫代硫酸钠来钝化残留的氧化剂。为了防止 pH 值对内毒素测试的干扰,先用无热原 Tris-HCl 缓冲液(pH 值=7.4)调节水样 pH 值。

1.5 内毒素活性的定量检测

采用动态浊度法鲎试验定量检测内毒素活性,测试样品和鲎试剂在温育(37℃)条件下发生凝集反应,ATI320-06 动态试管仪及软件生成每个样品的反应动态曲线,记录 405 nm 波长处达到 95% 透光度的达限时间。样品的达限时间和所含内毒素活性呈负相关,根据标准曲线来确定样品内毒素活性。采用 1.0、0.1、0.025 和 0.006 25 EU/mL CSE 做标准曲线,同时采用无热原细菌内毒素检查用水作为阴性对照。测试过程采用 0.1 EU/mL CSE 溶液作为阳性对照,记录内毒素活性和其他参数,例如回收率、稀释倍数、达限时间等。每个样品测试 3 次取平均值。测试结果应该满足以下条件:①标准曲线中阴性对照的达限时间长于标准曲线中最低活性(0.006 25 EU/mL)的达限时间;②标准曲线的相关系数 $R > 0.98$;③测试样品的平行样变异系数不得大于 10%;④根据我国药典规定,鲎试验中加标回收率在 50%~200% 之间认为稀释倍数合适,没有明显的干扰^[4]。

1.6 游离态内毒素与结合态内毒素的检测

测试过程中水样用 6 000g 离心 15 min,上清液中的内毒素活性是游离态内毒素,而离心前水样的

内毒素活性为总内毒素,总内毒素活性与游离态内毒素活性的差值就是结合态内毒素^[5]。

1.7 异养菌平板计数(HPC)

采用倾倒法进行异养菌平板计数,采用 R2A 培养基,培养温度为 22℃、时间为 168 h。每个样品测试 3 次取平均值。

1.8 菌落总数(平板计数法)

采用倾倒法进行菌落总数平板计数,采用营养琼脂,培养温度为 37℃,经 48 h 培养所生长的菌落总数为水样中的活菌数。每个样品测试 3 次取平均值。

1.9 细菌总数(流式细胞仪法)

将核酸染料 SYBR Green I 在 DMSO 溶液中按 1:100 稀释,最终稀释浓度为 10 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。采用 96 微孔板,加入 100 μL 水样后再加 1 μL 稀释后的 SYBR Green I 对水中细菌染色,摇匀后于 20℃ 下避光孵化 25 min。如果样品中细菌浓度过高,需要稀释后测量,细菌浓度范围控制在 $(3 \times 10^4) \sim (2 \times 10^6)$ cell/mL。采用流式细胞仪进行细菌计数,所测试的细胞数为水中活菌和死菌的总和。每个样品测试 3 次取平均值。

2 结果和分析

2.1 北京市水源水和水厂进出水

本研究检测了 3 个北京市水源水的内毒素活性(见图 1),其中河北水库水样的内毒素活性最低,仅为 21.3 EU/mL;密云水库水样的内毒素活性为 24.8 EU/mL,和河北水库内毒素活性相差不大;引水渠中内毒素活性为 68.2 EU/mL,明显高于密云水库和河北水库的水样,主要原因可能是在输水过程中渠壁和渠底容易滋生微生物导致内毒素的释放,此外由于是明渠,外界环境中的污染也容易引起水体的微生物污染。北京市 3 个水源水的游离态内毒素和结合态内毒素分布差异较大,其中密云水库的结合态内毒素较多,占 57%;而河北水库、某引水渠的结合态内毒素所占比例较低,分别为 35% 和 26%。

由图 1 还可以看出,北京市 A 水厂的进水内毒素活性较低,为 11.2 EU/mL,其中游离态内毒素为 4.2 EU/mL、结合态内毒素为 7.0 EU/mL,该内毒素水平低于北京水源水(21.3~68.2 EU/mL)。这是因为水源水进入水厂前需水质、水量的调节和预处理,所以水厂进水的内毒素活性略低于水源水。A 水厂出水的内毒素降为 4.1 EU/mL,其中游离态内

毒素为3.0 EU/mL、结合态内毒素仅为1.1 EU/mL,水厂的整个水处理流程对内毒素的去除率为63%,其中对结合态内毒素的去除效果较好,去除率高达84%;对游离态内毒素的去除效果较差,去除率为27%。这是因为游离态内毒素均为小分子物质,而结合态内毒素体积较大,属于水中悬浮颗粒物,容易在城市水厂的絮凝、沉淀等工艺流程中得到去除。

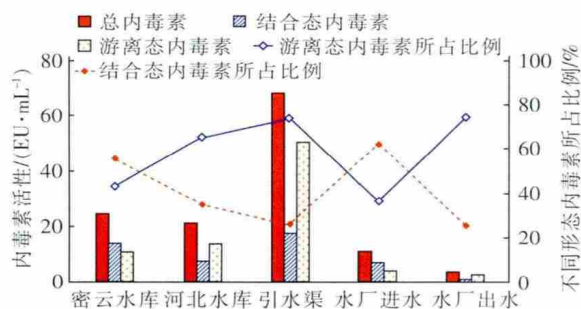


图1 北京市水源水和A水厂进出水的内毒素活性及形态分布比例

Fig.1 Activities and distribution of endotoxins in source water, influent and effluent of A Water Treatment Plant in Beijing

此外,表1列出了A水厂的进、出水中微生物指标的变化,其中细菌总数的测试结果代表水中活菌和死菌总数,而菌落总数结果只代表活的菌落数。

表1 北京市A水厂进、出水的HPC和细菌总数

Tab.1 HPC and bacterial cell counts in influent and effluent of A Water Treatment Plant in Beijing

项目	HPC/ (CFU · mL ⁻¹)	菌落总数/ (CFU · mL ⁻¹)	细菌总数/ (cell · mL ⁻¹)
进水	55 000	460	318 500
出水	未检出	未检出	16 000

结果表明,北京市A水厂对微生物的控制效果很有效,出水中HPC和菌落总数(平板计数)均未检出,但水厂出水中仍然存在较低水平的内毒素污染。这是因为虽然水厂整个处理流程去除细菌的同时也去除了与细菌相连的部分结合态内毒素,而其他形态的内毒素,如游离态内毒素、悬浮物附着的结合态内毒素、内毒素的大聚集体这三部分并不会随着细菌的去除而得到较高的去除率。此外,水处理工艺中被截留或者灭活的细菌死亡后沉入水厂构筑物底部,解体后仍会向水中释放游离态内毒素,继而增加水中形成结合态内毒素(和悬浮物结合的结合态内毒素、内毒素的大聚集体)的几率。此外,从表1还可以看出,虽然水厂出水中检测不到活菌菌落,但是水厂出水的细菌总数(流式细胞仪)测试表明出水

中未去除的死菌和活菌总数为16 000 cell/mL,这其中绝大多数可能都为死菌,但也说明了水厂出水必然会有细菌残体相连的结合态内毒素存在,也会有游离态内毒素的存在。因此,水样中内毒素污染水平和微生物指标有一定的关联,但并不一定呈正相关,水中微生物指标得到控制并不能代表水中内毒素污染得到控制,而且有时甚至会导致内毒素的大量释放。

目前,国内外有少量关于饮用水源水和水厂工艺水中内毒素污染的报道。日本淀川的内毒素活性在311~2 430 EU/mL之间^[6];津巴布韦哈拉雷的地表水源Chivero湖的内毒素浓度高达1 000~7 750 EU/mL^[7];加拿大蒙特利尔的13个地表水源的内毒素浓度为32~1 188 EU/mL^[8];芬兰的水源在蓝藻暴发后内毒素达到20~38 000 EU/mL^[9];我国长江(武汉段)、汉江(武汉段)的内毒素活性分别为100.98和86.40 EU/mL^[10]。与此比较,本研究采集的北京市3个水源水的内毒素污染水平较低,明显优于国外报道,也明显优于我国长江(武汉段)、汉江(武汉段)水质。据文献报道,芬兰9个自来水厂进水的内毒素浓度为18~356 EU/mL,水厂出水中内毒素浓度高达3~15 EU/mL,对内毒素的去除率为59%~97%^[9];武汉市平湖门水厂、宗关水厂的去除率分别为81.65%和51.76%^[10]。与国内外相关报道相比,北京市A水厂进、出水的内毒素污染水平偏低,水厂的处理流程对内毒素去除率和国内外水厂的相关报道基本一致。

2.2 北京市管网末梢水

北京市城区12个管网末梢水的内毒素活性范围为0.1~9.1 EU/mL(见图2)。

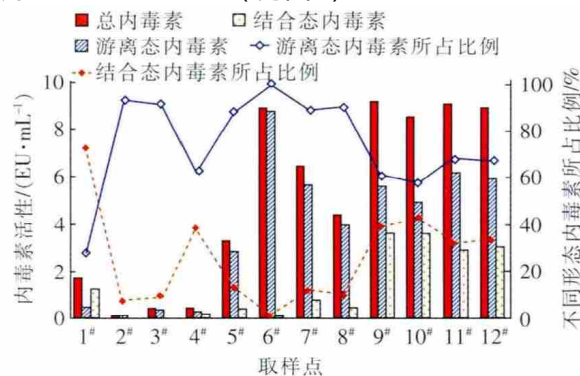


图2 北京城区管网末梢水的内毒素活性及形态分布比例

Fig.2 Activities and distribution of endotoxin in tap water of Beijing

图 2 表明,1[#]~4[#]取样点由地下水源的水厂供水,其内毒素活性范围为0.1~1.7 EU/mL;6[#]~12[#]取样点由地表水源的水厂供水,内毒素范围为4.4~9.1 EU/mL;5[#]取样点为地下水源的水厂和地表水源的水厂联合供水,其内毒素活性为3.3 EU/mL。以地下水为水源的水厂管网末梢水中内毒素活性明显低于地表水厂的管网水。6[#]和7[#]取样点由北京市A水厂供水,内毒素活性分别为8.9和9.1 EU/mL,都高于A水厂出水的内毒素活性(见图1),表明城市输配水管网中存在微生物污染,细菌死亡裂解后释放出大量内毒素。

在之前的研究报道中,采用单链构象多态性(SSCP)技术分析北京市给水管网的管壁微生物膜群落,在2个取样点中发现5种细菌,其中有假单胞菌和溶血不动杆菌两种革兰氏阴性菌^[11],这都可以导致给水管网中存在内毒素的释放。此外,图2还表明所采集的管网末梢水(除1[#]样品外)主要以游离态内毒素存在,管网水中以结合态内毒素存在的比例较少。目前,国内外关于城市生活饮用水中内毒素污染的研究较少,如伊拉克、科威特的自来水(海水淡化后)内毒素浓度为2.4~33.8 EU/mL^[12];澳大利亚管网末梢水的内毒素浓度为(<4)~119 EU/mL^[13];津巴布韦哈拉雷的自来水中内毒素浓度为60~205 EU/mL^[9];武汉市管网末梢水中内毒素活性范围为17.62~44.44 EU/mL^[10]。与国内外报道相比,北京市管网末梢水中内毒素污染水平明显偏低。

2.3 瓶装饮用水

瓶装饮用水中内毒素活性测试结果见表2。

表2 瓶装饮用水中内毒素活性测试结果

Tab.2 Endotoxin activities in bottled drinking water

EU · mL⁻¹

项 目	总内毒素	游离态内毒素	结合态内毒素
样 品	1 [#]	1.2	1.0
	2 [#]	0.02	—
	3 [#]	4.0	3.6
	4 [#]	<0.004	—
	5 [#]	<0.004	—
	6 [#]	16.0	12.9
	7 [#]	2.3	2.1
	8 [#]	0.5	—
	9 [#]	<0.004	—

由表2可知,本研究中9种瓶装饮用水的内毒

素活性范围为(<0.004)~16.0 EU/mL,可见瓶装饮用水的内毒素活性差异较大,4[#]、5[#]和9[#]样品的内毒素活性未达检测限,而6[#]样品的内毒素浓度高达16.0 EU/mL。本研究检测的9种瓶装饮用水来自国内不同的9个生产厂家,虽然厂家采用的制水工艺和消毒工艺有差异,但本研究结果表明制备瓶装饮用水的给水深度处理技术并不能彻底去除水中内毒素,甚至还可能产生二次污染导致内毒素的释放。因此瓶装水的水处理工艺及其维护措施的差异导致内毒素污染活性的变化还需要进一步研究。内毒素活性较高的4个样品(1[#]、3[#]、6[#]和7[#])中大部分以游离态内毒素存在,这是因为给水深度处理后的瓶装饮用水中悬浮物和细菌总数等明显减少,结合态内毒素活性减少。目前,国外对瓶装饮用水的内毒素研究报道还比较少,科威特的瓶装水内毒素活性为(<0.03)~20.10 EU/mL^[12];波多黎各的瓶装水内毒素活性为(<0.062 5)~32 EU/mL^[14]。本研究表明我国瓶装饮用水中内毒素污染水平和国外报道基本相同。

3 结论

对北京市城市生活饮用水和市售瓶装饮用水的内毒素活性进行检测,结果表明北京市3个水源水的内毒素活性范围为21.3~68.2 EU/mL;北京市A水厂进水的内毒素活性为11.2 EU/mL,出水的内毒素活性为4.1 EU/mL,水厂处理流程对内毒素的去除率达63%;北京市城区12个管网末梢水的内毒素范围为0.1~9.1 EU/mL;市售9种瓶装饮用水内毒素活性范围为(<0.004)~16.0 EU/mL。与国内外相关报道相比,北京市水源水、水厂进出水和管网末梢水中内毒素活性明显偏低。我国瓶装饮用水中内毒素污染水平和国外报道基本相同。近年来,饮用水的内毒素研究在国外得到越来越多的关注。当水源中细菌增殖或者蓝藻暴发时,菌体死亡后释放大量的内毒素,城市水厂不能完全去除内毒素污染,饮用水中内毒素活性的提高会导致通过饮用、呼吸等暴露途径对消费者产生潜在的健康危害。此外,血液透析用水和制药用水等医疗用水都以市政供水为水源,城市管网末梢水中内毒素活性的提高,也增加了透析用水和制药用水等医疗用水制备工艺对内毒素控制的难度,导致内毒素通过血液接触危害患者机体的风险剧增。目前国内外尚没有将内毒素列入饮用水水质标准,因此进一步明确饮用水中内毒素

对机体危害机理和安全阈值,有效控制城市饮用水中内毒素污染水平,对保障饮用水水质安全和医疗用水水质安全都具有重要意义。

参考文献:

- [1] Erridge C, Bennett-Guerrero E, Poxton I R. Structure and function of lipopolysaccharides [J]. *Microbes and Infection* 2002, 4(8): 837–851.
- [2] Michel O. Role of lipopolysaccharide (LPS) in asthma and other pulmonary conditions [J]. *J Endotoxin Res*, 2003, 9(5): 293–300.
- [3] Elin Dr R J, Wolff S M, McAdam K P W J *et al.* Properties of reference *Escherichia coli* endotoxin and its phthalylated derivative in humans [J]. *J Infect Dis*, 1981, 144(4): 329–336.
- [4] 中国国家药典委员会. 中华人民共和国药典 [M]. 北京: 中国医药科技出版社 2005.
- [5] Anderson W B, Slawson R M, Mayfield C I. A review of drinking-water-associated endotoxin, including potential routes of human exposure [J]. *J Microbiol*, 2002, 48(7): 567–587.
- [6] Ohkouchi Y, Ishikawa S, Takahashi K *et al.* Factors associated with endotoxin fluctuation in aquatic environment and characterization of endotoxin removal in water treatment process [J]. *Environ Eng Res*, 2007, 44: 247–254.
- [7] Annadotter H, Cronberg G, Nystrand R *et al.* Endotoxins from cyanobacteria and gram-negative bacteria as the cause of an acute influenza-like reaction after inhalation of aerosols [J]. *Ecohealth* 2005, 2(3): 209–221.
- [8] Ronald G, Santiago P U, Isabel Fatima D S B, *et al.* Concentrations of endotoxins in waters around the island of Montreal, and treatment options [J]. *Water Qual Res J Can* 2008, 43(4): 291–303.
- [9] Rapala J, Lahti K, Rasanen L A *et al.* Endotoxins associated with cyanobacteria and their removal during drinking water treatment [J]. *Water Res* 2002, 36(10): 2627–2635.
- [10] 段凌, 王欣, 张怡, 等. 武汉市自来水处理工艺过程中内毒素的含量 [J]. *环境与健康杂志* 2008, 25(10): 856–858.
- [11] 刘小琳, 刘文君, 金丽燕, 等. 北京市给水管网管壁微生物膜群落 [J]. *清华大学学报: 自然科学版* 2008, 48(9): 78–81.
- [12] Abdulraheem A, Mustafa S, Al-Saffar N *et al.* Detection of bacterial endotoxin in drinking tap and bottled water in Kuwait [J]. *Environ Monitor Assess* 2012, 184(12): 7323–7328.
- [13] O'Toole J, Sinclair M, Jeavons T *et al.* Alternative water sources and endotoxin [J]. *Water Sci Technol* 2008, 58(3): 603–607.
- [14] Reyes M I, Pérez C M, Negrón E L. Microbiological assessment of house and imported bottled water by comparison of bacterial endotoxin concentration, heterotrophic plate count and fecal coliform count [J]. *Puerto Rico Health Sci J* 2008, 27(1): 21–26.



作者简介: 刘文君(1968–), 男, 湖南桂阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为安全饮用水理论与技术, 在饮用水深度处理技术、安全消毒技术、管网水质稳定性控制和远洋船舶压载水处理技术等方面取得多项重要成果。

E-mail: zhancanqu@163.com

wjliu@tsinghua.edu.cn

通讯作者: 刘文君

收稿日期: 2013–01–13