

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析

张灿¹, 刘文君², 敖澍^{2,3}, 史云¹, 安代志¹, 刘治平¹

(1. 军事医学科学院疾病预防控制中心, 北京 100071; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 解放军后勤工程学院国防建筑规划与环境工程系, 重庆 401311)

摘要: 本研究采集驻京部队 14 个自备井水源样品, 采用动态浊度东方堇试验定量检测内毒素活性, 同时检测了细菌总数(流式细胞术法)、异养菌平板计数(HPC)、菌落总数(平板法)、总大肠菌群、颗粒物特征、浊度、溶解性有机碳(DOC)和 UV₂₅₄ 值, 比较了内毒素与这些水质参数的相关性。结果表明自备井水源的总内毒素活性为 0.15 ~ 13.20 EU·mL⁻¹, 其中游离态内毒素活性为 0.10 ~ 5.29 EU·mL⁻¹, 结合态内毒素活性为 0.01 ~ 8.60 EU·mL⁻¹。对于内毒素污染较严重的自备井水源来说, 结合态内毒素所占比例明显高于游离态内毒素。总内毒素与其他水质参数关联顺序为细菌总数(流式细胞术法)($r=0.88$) > HPC ($r=0.79$) > DOC ($r=0.77$) > UV₂₅₄ ($r=0.57$) > 总大肠菌群($r=0.50$) > 菌落总数-平板法($r=0.49$) = 浊度($r=0.49$) > 颗粒物总数($r=0.41$)。结合态内毒素与其他水质参数关联顺序为细菌总数-流式细胞术法($r=0.81$) > HPC ($r=0.66$) > 总大肠菌群($r=0.65$) > 浊度($r=0.62$) > 颗粒物总数($r=0.58$) > 菌落总数(平板法)($r=0.22$)。游离态内毒素与水中 DOC、UV₂₅₄ 的相关系数 r 分别为 0.58 和 0.26, 结果表明游离态内毒素与水中 DOC 的相关性较大, 与 UV₂₅₄ 相关性很小。

关键词: 自备井; 饮用水; 内毒素; 细菌; 悬浮颗粒物; 溶解性有机碳

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4561-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.12.031

Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing

ZHANG Can¹, LIU Wen-jun², AO Lu^{2,3}, SHI Yun¹, AN Dai-zhi¹, LIU Zhi-ping¹

(1. Institute of Disease Control and Prevention, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of National Defense Architecture Planning & Environmental Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China)

Abstract: A survey of endotoxin activity in groundwater from 14 self-contained wells in PLA units stationed in Beijing was conducted by the kinetic-turbid assay of *Tachypleus* Amebocyte Lysate (TAL). Bacteriological parameters, including total cell counts detected by flow cytometry, heterotrophic plate counts (HPC), standard plate counts and total coliforms were analyzed. Additionally, suspended particles, turbidity, dissolved organic carbon (DOC), and UV₂₅₄ were investigated. Total endotoxin activities ranged from 0.15 to 13.20 EU·mL⁻¹, free endotoxin activities ranged from 0.10 to 5.29 EU·mL⁻¹ and bound endotoxin activities ranged from 0.01 to 8.60 EU·mL⁻¹. Most of the endotoxins in heavily contaminated groundwater existed as bound endotoxins. As for total endotoxins, the sequence of correlation coefficients with other parameters was total cell counts ($r=0.88$) > HPC ($r=0.79$) > DOC ($r=0.77$) > UV₂₅₄ ($r=0.57$) > total coliforms ($r=0.50$) > standard plate counts ($r=0.49$) = turbidity ($r=0.49$) > total particles ($r=0.41$). The sequence of correlations of the bound endotoxins with other parameters was total cell counts ($r=0.81$) > HPC ($r=0.66$) > total coliforms ($r=0.65$) > turbidity ($r=0.62$) > total particles ($r=0.58$) > standard plate counts ($r=0.22$). Free endotoxins were correlated with DOC and UV₂₅₄, $r=0.58$ and 0.26, respectively. Result showed free endotoxins had a higher correlation with DOC, and a lower correlation with UV₂₅₄.

Key words: self-contained wells; drinking water; endotoxin; bacteria; suspended particles; dissolved organic carbon

细菌内毒素又称脂多糖, 是革兰氏阴性细菌和某些蓝藻的细胞壁组分物质, 活菌释放较少, 主要由菌体解体后释放^[1]。内毒素是常见的外源性致热原, 属于强免疫刺激因子, 具有广泛的生物活性, 与多种人类疾病密切相关。机体对内毒素反应极为敏感, Elin 等^[2]报道了使用 0.1 ~ 0.5 ng·kg⁻¹ 内毒素进行体内注射可以引起人体的发热反应。内毒素具有极强的耐热性, 100℃ 高温下加热 1 h 仍无法灭

活, 160℃ 条件下加热 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处理工艺不易将其去除。为了保证与血液接触的药品、医疗器械及医疗用水的安全

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378283); 北京市自然科学基金项目(8142033)

作者简介: 张灿(1975 ~), 女, 博士, 主要研究方向为饮用水水质安全, E-mail: zhangcancqu@163.com

性,内毒素检查一直被认为是医药行业的重要检验项目。

当水中微生物增殖或者蓝藻暴发,菌体自然死亡或者经过消毒处理后释放的大量内毒素,可以通过呼吸和胃肠暴露等途径危害机体健康。近年来,国外研究中饮用水的内毒素污染报道逐年增多,但是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^[3]。内毒素在水中存在形态比较复杂,分为游离态内毒素和结合态内毒素,均具有内毒素活性。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,主要分为以下三类: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等。水体流速和流态对不同存在形态内毒素会产生影响,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^[4]。自备井是驻扎城市郊区和边远地区基层部队的主要水源。由于部队驻地偏远分散,自备井水质特征差别较大,部队管理难度大,其中微生物和内毒素污染更容易直接影响官兵健康。本研究对驻京部队14个自备井水源内毒素污染水平开展调查,分析了内毒素的两种存在形态所占比例,并同时检测了细菌学指标、颗粒物特征、浊度、溶解性有机碳(DOC)和UV₂₅₄,探讨了内毒素活性与这些水质参数的相关性,旨在为自备井水源的水处理工艺选择提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 玻璃器皿

无热原稀释试管(15 mm × 100 mm)、无热原反应试管(8 mm × 75 mm)和无热原移液器吸头购买自湛江安度斯生物公司。其他玻璃器皿经铬酸浸泡24 h,热自来水冲洗,超纯水冲洗,马弗炉干烘350 ~ 400℃ 2 h去除热原。

1.2 仪器与试剂

ATI320-06 动态试管仪及配套软件(Lab Kinetic 公司,英国)、流式细胞仪(Beckman Coulter, Inc., Brea, CA, 美国)、EyeTech 颗粒计数仪(安米德公司,荷兰)、O. I. Analytical Aurora 1030 TOC 分析仪、TU-1901 型双光束紫外可见分光光度仪(北

京普析通用仪器有限责任公司)、HACH-2100P 便携式浊度计(HACH 公司,美国)、Pb-21 酸度计(Sartorius 公司,德国)、Mill-Q 纯水机(Millipore 公司,美国)、涡旋混合器、马弗炉、移液器。动态浊度法鲎试剂(最低检测限0.03 EU·mL⁻¹)、无热原检查用水(<0.003 EU·mL⁻¹)和无热原 Tris-HCl (pH 7.4)缓冲溶液购买自湛江安度斯生物公司。内毒素工作标准品(control standard endotoxin, CSE,批号150601,每支90 EU)购买自中国药品生物制品检定所(北京)。R2A 培养基(Difco™ R2A Agar, BD, Becton, Dickinson and Company, 美国),营养琼脂(Nutrient Agar, 北京奥博星生物技术有限责任公司),SYBR Green I(北京泛博生物化学有限公司),DMSO(Amresco 公司,美国)。

1.3 水样采集

在2013年5月对驻京部队14个自备井水源进行采样,采样容器均为无热原器皿,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 水样检测

1.4.1 动态浊度法鲎试验检测内毒素活性

采用动态浊度法鲎试验定量检测内毒素活性,将0.1 mL 鲎试剂加入反应管,加入0.1 mL 样品混合均匀,立即放入ATI320-06 动态试管仪进行检测。样品和鲎试剂在37℃温育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,记录反应试管在波长405 nm 处达到95%透光率的达限时间。样品的达限时间和所含内毒素活性负相关,根据标准曲线来确定样品内毒素活性。每个样品采用2个平行样,并以0.1 EU·mL⁻¹CSE 溶液作为阳性对照,记录回收率、稀释倍数、达限时间等其他参数。样品测试3次取均值。试验结果应满足以下条件:①标准曲线中阴性对照的达限时间长于最低活性(0.031 25 EU·mL⁻¹)的达限时间。②标准曲线相关系数R 大于0.98。③平行样的变异系数不得大于10%。④根据药典规定,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^[5]。

1.4.2 游离态内毒素与结合态内毒素的检测

测试过程中水样用6 000 r·min⁻¹离心15 min,上清液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,总内毒素活性减去游离态内毒素活性的差值就是结合态内毒素^[3]。

1.4.3 细菌总数(流式细胞术法)

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 $10 \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。采用 96 微孔板,加入 100 μL 水样后加 1 μL 稀释后的 SYBR Green I 对水中细菌染色,摇匀后 20°C 避光孵化 25 min。如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 $3 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。采用流式细胞仪(Beckman Coulter, Inc., Brea, CA, 美国)进行细菌计数。所测试的细菌总数为水中活菌和死菌的总和。每个样品测试 3 次取平均值。

1.4.4 异养菌平板计数(heterotrophic plate count, 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°C ,时间为 168 h。每个样品测试 3 次取平均值。

1.4.5 菌落总数(平板法)

按照 GB/T 5750.12-2006《生活饮用水标准检验方法-微生物指标》菌落总数(琼脂倾注法)测定^[6]。

1.4.6 总大肠菌群

按照 GB/T 5750.12-2006《生活饮用水标准检验方法-微生物指标》总大肠菌群检验(滤膜法)测定^[6]。

1.4.7 颗粒物特征

采用 EyeTech 颗粒计数仪(阿米德公司,荷兰)测试水中颗粒物的粒径分布和颗粒物总数,其颗粒物粒径的范围是 $0.1 \sim 3\ 600 \mu\text{m}$,颗粒物测试的最大浓度为 $10^9 \text{ 个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.4.8 浊度

采用 HACH-2100P 便携式浊度计对水样的浊度进行测定。

1.4.9 DOC

经 Millipore 滤膜($0.45 \mu\text{m}$)过滤后,通过 O. I. Analytical Aurora 1030 TOC 分析仪测定溶解性有机碳。

1.4.10 UV_{254}

经 Millipore 滤膜($0.45 \mu\text{m}$)过滤后,通过 TU-1901 型双光束紫外可见分光光度计测定 UV_{254} 的数值。

2 结果与分析

2.1 自备井水源的内毒素污染特征

自备井水源的内毒素活性如图 1 所示,总内毒素活性为 $0.15 \sim 13.20 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$,游离态内毒素活

性为 $0.10 \sim 5.29 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$,结合态内毒素活性为 $0.01 \sim 8.60 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。由于本研究中采样的部队营区非常分散,自备井水源水质污染特征不同,图 1 所示 14 个自备井内毒素活性差异较大。其中 1~6 号样品的内毒素污染水平较低,总内毒素活性都低于 $0.50 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。7~14 号样品内毒素污染水平较高,其中 6 个样品(除 10 号和 12 号之外)均是结合态内毒素所占比例明显高于游离态内毒素,9 号样品的结合态内毒素比例最高达 91.50%。这表明在内毒素污染严重的自备井水源中,内毒素主要是以 3 种形式(内毒素聚集体、附着在颗粒物表面的内毒素、与菌体残体相连的内毒素)的结合态内毒素存在。国内外研究中关于地下水源和地表水源的内毒素污染已有少量报道。Korsholm 等^[7]研究表明 233 个地下水样品(包括原水、处理后出水、末梢水)的内毒素活性范围为 $1 \sim 200 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$,其中大多数处于 $1 \sim 30 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 范围。Goyal 等^[8]报道了污水土地利用地域的地下水内毒素活性范围为 $0.3 \sim 480 \text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ (1 ng 为 $5 \sim 10 \text{ EU}$)。北京市水源-河北 4 个水库水在北京-石家庄段输送断面中内毒素活性为 $21.29 \sim 41.12 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[9];密云水库水的内毒素活性为 $24.80 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$;京密引水渠中内毒素活性为 $68.20 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[4]。我国长江(武汉段)、汉江(武汉段)的内毒素活性分别为 $100.98 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $86.40 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[10]。与前述报道中地表水源和受污染地下水源的内毒素污染水平相比,图 1 所示的自备井水源内毒素活性范围略低。

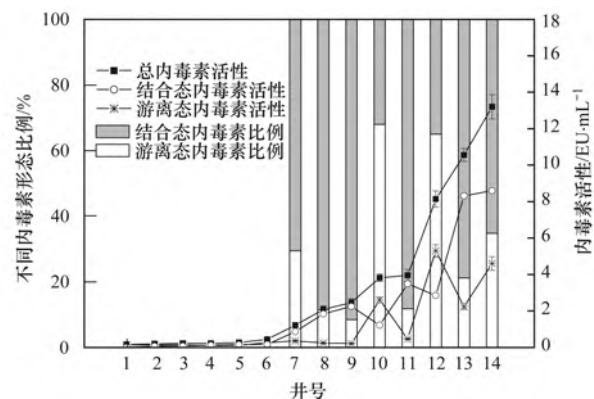


图 1 自备井水源的内毒素污染特征

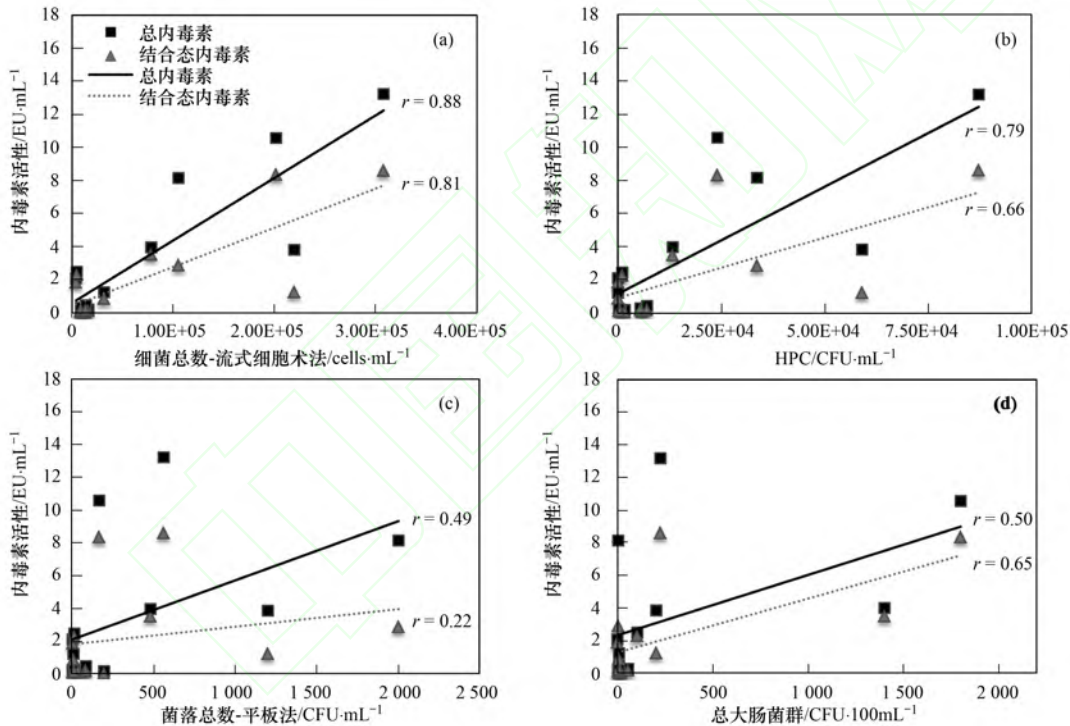
Fig. 1 Endotoxin contamination of groundwater in self-contained wells

2.2 内毒素污染与细菌学指标的相关性

自备井水源的细菌总数(流式细胞术法)检测值为 $4\ 000 \sim 308\ 000 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ [图 2(a)], HPC 为 $24 \sim 87\ 200 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ [图 2(b)], 菌落总数(平板法)为 $7 \sim 2\ 020 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ [图 2(c)], 总大肠菌群

为 $8 \sim 1\,810 \text{ CFU} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ [图 2(d)]. 总内毒素和细菌学指标的关联顺序为细菌总数-流式细胞术法 ($r = 0.88$) > HPC ($r = 0.79$) > 总大肠菌群 ($r = 0.50$) > 菌落总数-平板法 ($r = 0.49$). 在内毒素的两种存在形态中, 结合态内毒素包含与菌体残体相连的内毒素分子, 与水中菌体残体数量相关性大; 游离态内毒素是由菌体解体后释放到水中, 与水中活菌或者死菌相关性都较小. 图 2 表明结合态内毒素与细菌学指标关联顺序为细菌总数-流式细胞术法 ($r = 0.81$) > HPC ($r = 0.66$) > 总大肠菌群 ($r = 0.65$) > 菌落总数-平板法 ($r = 0.22$). 如图 2 所示, 与 HPC、菌落总数(平板法)和总大肠菌群这 3 种培养计数方法相比, 细菌总数(流式细胞术法)和总内毒素、结合态内毒素的相关性最高, 原因是结合态内毒素和死亡菌体相关, 而细菌总数

(流式细胞术法)包含死菌和活菌的数量, 培养计数方法却只能表征活菌数量. 从中可知, 在 3 种培养计数方法中, HPC 与总内毒素、结合态内毒素的相关性明显高于菌落总数(平板法)和总大肠菌群, 表明 R2A 培养基比较适于培养与内毒素相关的细菌. Evans 等^[11] 报道河流水样的总内毒素与 HPC 的相关系数为 $r = 0.88$, 结合态内毒素与 HPC 的相关系数为 $r = 0.95$. Korsholm 等^[12] 报道了 229 个未加氯的饮用水中总内毒素和 HPC 的相关系数为 $r = 0.60$. Jorgensen 等^[13] 报道了再生水中总内毒素与菌落总数(平板法)的相关系数为 $r = 0.73$, 总内毒素与总大肠菌群的相关系数为 $r = 0.82$. 前述研究表明水中内毒素活性与细菌学指标之间存在相关性, 这与图 2 所示的结果基本等同.



(a) 内毒素与细菌总数(流式细胞术法); (b) 内毒素与 HPC; (c) 内毒素与菌落总数(平板法); (d) 内毒素与总大肠菌群

图 2 自备井水源的内毒素与细菌学指标的相关性

Fig. 2 Correlations between endotoxins and bacteriological parameters in self-contained wells

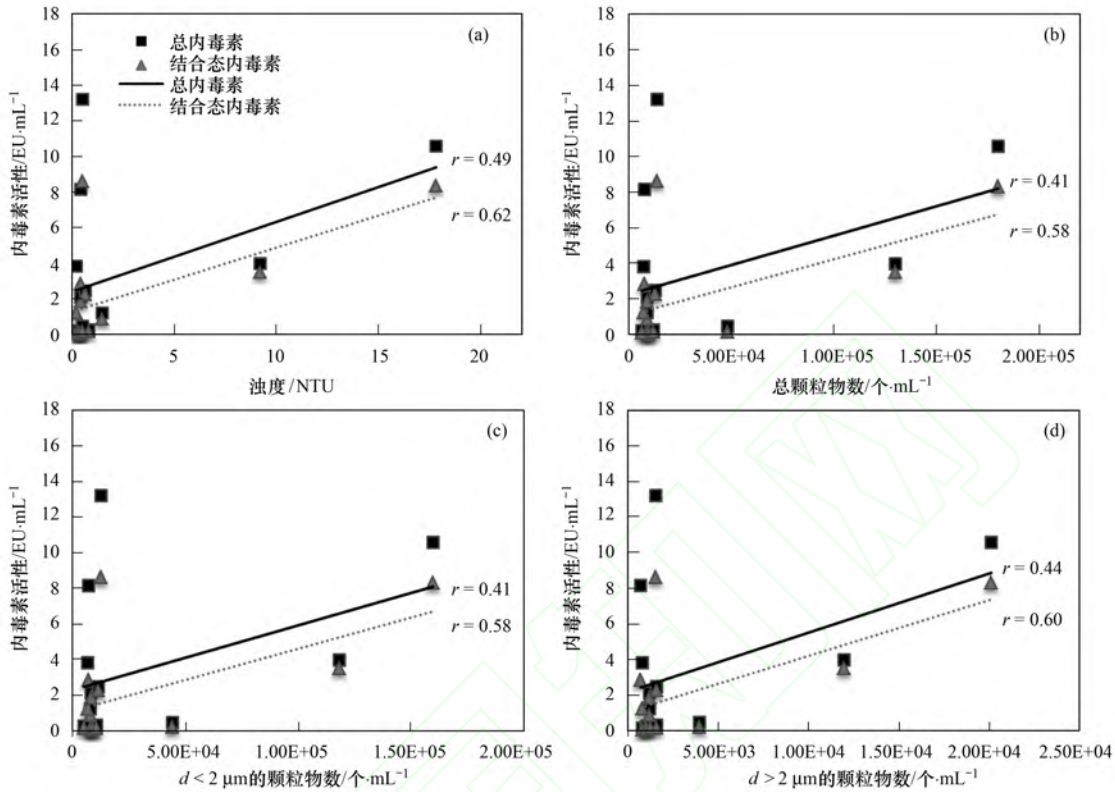
2.3 内毒素污染与颗粒物特征的相关性

自备井水源的浊度为 $0.2 \sim 17.8 \text{ NTU}$ [图 3(a)], 颗粒物总数为 $6\,400 \sim 180\,000 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ [图 3(b)]. 总内毒素与浊度的相关系数 ($r = 0.49$) 略高于与颗粒物总数的相关系数 ($r = 0.41$). 在内毒素的两种分布形态中, 结合态内毒素对水中颗粒物和浊度的检测有一定的贡献, 而游离态内毒素呈溶解性, 与颗粒物和浊度的相关性较小. 图 3 表明结合

态内毒素与浊度的相关系数 ($r = 0.62$), 与颗粒物总数的相关系数 ($r = 0.58$), 这都要高于总内毒素与浊度 ($r = 0.49$) 和颗粒物总数 ($r = 0.41$) 的相关系数. 总内毒素、结合态内毒素与颗粒物总数、浊度的相关性(图 3)明显低于与细菌总数(流式细胞术法)和 HPC 的相关性(图 2), 原因是颗粒物和浊度中含有很多无机成分, 与细菌和内毒素活性无关. 此外, 从图 3(c) 和图 3(d) 可知, 内毒素活性与小粒

径颗粒物数 ($d < 2 \mu\text{m}$) 和大粒径颗粒物数 ($d > 2 \mu\text{m}$) 的相关性差异不大, 这表明结合态内毒素在实际水体的存在状态复杂, 有的小粒径颗粒物具有内毒素活性, 如小粒径的内毒素聚集体、附在小粒径

颗粒物表面的内毒素分子、和菌体残体相连的内毒素。此外, 大粒径颗粒物也具有内毒素活性, 主要原因是一些大粒径颗粒物的表面积大, 也容易被疏水性的内毒素分子附着。



(a) 内毒素与浊度; (b) 内毒素与颗粒物总数; (c) 内毒素与小粒径颗粒物数 ($d < 2 \mu\text{m}$); (d) 内毒素与大粒径颗粒物数 ($d > 2 \mu\text{m}$)

图3 自备井水源内毒素与颗粒物、浊度的关联性

Fig. 3 Correlations of endotoxins, suspended particles and turbidity self-contained wells

2.4 内毒素污染与 DOC 和 UV_{254} 的相关性

图 4 表明自备井水源 DOC 值为 $0.4 \sim 1.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, UV_{254} 值为 $0.005 \sim 0.026 \text{ cm}^{-1}$. 总内毒素与 DOC 的相关系数 ($r = 0.77$) 要高于与 UV_{254} 的相关系数 ($r = 0.57$). 在内毒素的两种存在形态中, 游

离态内毒素对水中 DOC 有一定的贡献, 结合态内毒素与 DOC 的相关性差. 如图 4 所示, 自备井水源的游离态内毒素和 DOC 相关系数 ($r = 0.58$) 和 UV_{254} 相关系数 ($r = 0.26$), 结果表明游离态内毒素与水中 DOC 的相关性较大, 与 UV_{254} 相关性很小。

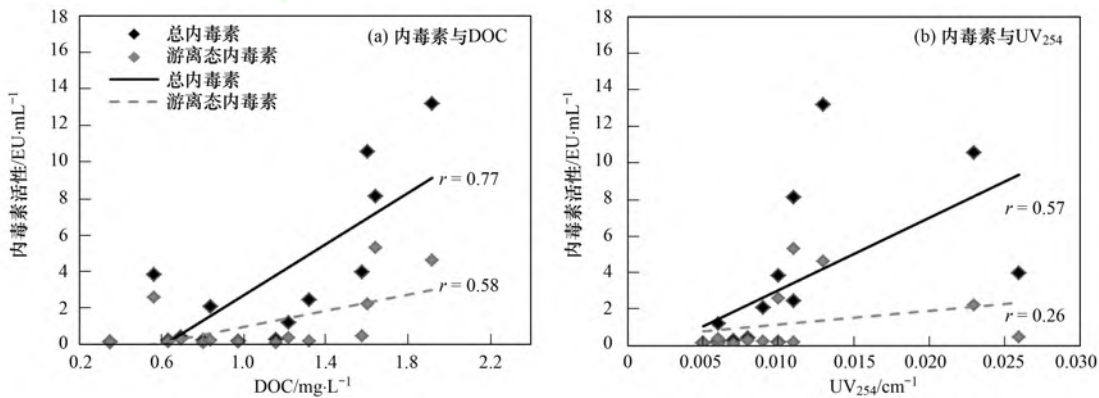


图4 自备井水源内毒素与 DOC、 UV_{254} 的相关性

Fig. 4 Correlations of endotoxins, DOC and UV_{254} in self-contained wells

3 结论

自备井是驻扎城市郊区和边远地区基层部队的主要水源。由于部队驻地偏远分散,自备井水质差别明显,管理难度大,其中微生物和内毒素污染更容易直接影响官兵健康。本研究对驻京部队 14 个自备井水源内毒素污染水平开展调查,并同时检测了细菌学指标、颗粒物特征、浊度、DOC 和 UV_{254} ,旨在为自备井水源的水处理工艺选择提供科学依据。结果表明,驻京部队 14 个自备井水源的总内毒素活性为 $0.15 \sim 13.20 \text{ EU} \cdot \text{mL}^{-1}$,其中游离态内毒素活性为 $0.10 \sim 5.29 \text{ EU} \cdot \text{mL}^{-1}$,结合态内毒素活性为 $0.01 \sim 8.60 \text{ EU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。对于内毒素污染较严重的自备井水源来说,结合态内毒素所占比例明显高于游离态内毒素。自备井水源的总内毒素、结合态内毒素与细菌总数(流式细胞术法)、HPC 的相关性比较高。溶解性的游离态内毒素和水中有机物具有关联,其与 DOC、 UV_{254} 的相关系数分别为 $r=0.58$ 和 0.26 ,表明游离态内毒素和 DOC 有一定的相关性,和 UV_{254} 相关性很小。

参考文献:

- [1] Anderson W B, Slawson R M, Mayfield C I. A review of drinking-water-associated endotoxin, including potential routes of human exposure[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2002, 48(7): 567-587.
- [2] Elin R J, Wolff S M, McAdam K P, et al. Properties of reference Escherichia coli endotoxin and its phthalylated derivative in humans[J]. The Journal of Infectious Diseases, 1981, 144(4): 329-336.
- [3] 张灿,刘文君,张明露,等. 水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1597-1601.
- [4] 张灿,刘文君,张明露,等. 生活饮用水和瓶装饮用水的细菌内毒素活性调查[J]. 中国给水排水, 2013, 29(13): 47-52.
- [5] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] GB/T 5750.12-2006, 生活饮用水标准检验方法 微生物指标[S].
- [7] Korsholm E, Sogaard H. An evaluation of direct microscopical counts and endotoxin measurements as alternatives for total plate counts[J]. Water Research, 1988, 22(6): 783-788.
- [8] Goyal S M, Gerba C P. Occurrence of endotoxins in groundwater during the land application of wastewater [J]. Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering, 1982, 17(2): 187-196.
- [9] Zhang C, Liu W J, Sun W, et al. Endotoxin contamination and control in surface water sources and a drinking water treatment plant in Beijing, China[J]. Water Research, 2013, 47(11): 3591-3599.
- [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] Evans T M, Schillinger J E, Stuart D G. Rapid determination of bacteriological water quality by using *Limulus lysate*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1978, 35(2): 376-382.
- [12] Korsholm E, Sogaard H. Comparison of endotoxin (LPS) measurements and plate counts for bacteriological assessment of drinking water[J]. Zentralblatt für Bakteriologie, Mikrobiologie und Hygiene. Serie B, 1987, 185(1-2): 121-130.
- [13] Jorgensen J H, Lee J C, Pahren H R. Rapid detection of bacterial endotoxins in drinking water and renovated wastewater [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1976, 32(3): 347-351.