



东部地区农村给水管网中铝含量及形态分析

高佳丽^{1,2} 刘泉利¹ 宋来洲² 李贵伟^{1,3} 马 徐¹ 陶 辉⁴ 石宝友^{1,3}

(1 中国科学院生态环境研究中心中国科学院饮用水科学与技术重点实验室,北京 100085; 2 燕山大学环境与化学工程学院,秦皇岛 066004; 3 中国科学院大学,北京 100049; 4 河海大学,南京 210098)

摘要 以我国东部实行城乡一体化供水的 4 个城市实际给水管网为研究对象,在调查农村用户端饮用水中残余铝含量及其存在形态的基础上,深入分析饮用水中残余铝的来源和超标的原因,探讨不同形态铝与浊度的相关性。结果表明:城乡一体化供水下,在出厂水达标时用户端仍存在总铝超标的情况,特别是出厂水残余铝浓度大于 $100 \mu\text{g/L}$ 时超标风险较大。与出厂水对比,龙头水中颗粒铝和溶解铝浓度都有增加,出厂水混凝剂残留与管网输配过程中沉积铝的释放是用户端铝超标的主要原因。颗粒铝与浊度具有显著的相关性,浊度在一定程度上能反映颗粒铝的含量。管网水力条件的不稳定导致出厂水残余铝易在管网输配过程中沉积或释放,用户端残余铝随输水距离呈现先逐渐升高再降低的规律。

关键词 一体化供水 管网水质 残余铝 形态 浊度

中图分类号: TU990.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-8471(2019)06-0120-06

DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2019.06.023

The content and existing form of aluminum in rural water distribution system in eastern China

Gao Jiali^{1,2}, Liu Quanli¹, Song Laizhou², Li Guiwei^{1,3}, Ma Xu¹, Tao Hui⁴, Shi Baoyou^{1,3}

(1. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

2. College of Environmental and Chemical Engineering, Yanshan University,

Qinhuangdao 066004, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 4. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, the actual water supply pipe network of four cities in eastern China with integrated urban and rural water supply model was taken as research object. Based on the investigation of residual aluminum content and its speciation distribution, the residual aluminum sources and the reason for exceeding the standards were analyzed. It also explored the correlation of residual aluminum form and turbidity. The results show that the total aluminum can exceed the standard at consumers' tap when finished water reaches the standard under the urban-rural integrated water supply. In particular, the risk of exceeding the standard is high when the residual aluminum concentration in the finished water is greater than $100 \mu\text{g/L}$. The concentrations of particle aluminum and dissolved aluminum in the tap water are higher than the finished water. In the tap water, the main reason for aluminum exceeding the standard is residue of coagulants and release of

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400803);国家自然科学基金项目(51678558)。



particle aluminum in the distribution process. There is a significant correlation between particle aluminum and turbidity, and turbidity represents the content of particle aluminum. Due to the unstable hydraulic conditions of the pipe network, the residual aluminum of finished water is easy to deposit or release in the distribution process. The residual aluminum at consumers' tap increases gradually with the distance of water delivery, and then decreases. Some feasible suggestions are put forward to control the residual aluminum for water plant in drinking water.

Keywords: Integrated water supply; Distribution system water quality; Residual aluminum; Form; Turbidity

0 引言

经水厂处理后的出厂水需要经过管网系统输送到用户,达标的出厂水在长距离的管网输配过程中会发生复杂的物理、化学和生物变化,这些变化直接影响用户端的水质^[1]。长距离管网输配过程中最易发生用户端龙头水浊度与色度的升高的水质恶化现象,这是导致消费者投诉最多的水质问题^[2]。而混凝工艺作为饮用水常规处理工艺中不可或缺的一环,可有效地去除原水中的浊度、细菌和部分有机物,但同时会造成处理后水中混凝剂组分的残留。水处理过程中投加的铝盐或铁盐类混凝剂是出厂水残留颗粒物的组成部分,并且残留的铝、铁即使在出厂水中是以溶解态存在的,在输配过程中仍可继续水解聚合而不断析出,并在管壁上沉淀、累积^[3,4]。

目前,我国 80% 以上的水厂在混凝工艺中使用铝盐混凝剂。铝盐混凝剂的使用所造成的饮用水残留铝对人体健康和生态系统的毒性效应目前已经引起人们的高度重视^[5],人体过量摄入铝会引起老年性痴呆症、肾衰竭、心血管疾病等。崔福义等^[6]对我国 40 座城市饮用水水质的初步调查显示,32.5% 的城市饮用水中铝浓度超出国家标准限值,以东北地区为甚;张玥等^[7]对我国北方和南方 2 个城市实际管道中的沉积物调查发现,沉积物中铝的含量高达 94 400 $\mu\text{g}/\text{g}$ (干重);Wang 等^[8]对我国东北某城市管网铝形态的研究中发现,悬浮颗粒铝占总铝的比例高达 40% 以上,在水源切换时会导致悬浮颗粒态铝突发性释放。这些研究表明管网中存在较严重的铝沉积现象且在水质变化时沉积的铝会释放造成管网的二次污染。

本次调研选择较早实施城乡一体化供水且模式比较成熟的 4 个城市给水管网为研究对象,在调查

城乡一体化供水模式下农村用户端残留铝含量及存在形态基础上,分析饮用水中铝的来源和超标的原因,同时研究不同形态铝与浊度的相关性,探讨残余铝随距离的变化规律,最终提出保障供水水质安全的可行性建议。

1 材料与方法

1.1 水样采集和预处理

此次调查主要在 2017 年 5 月~2018 年 4 月间进行,涉及中国东部地区 GY、SY、YZ 和 YX 等 4 个城市,调研采集水源水、出厂水及用户端龙头水 3 类水样。采集的 3 种类型的水样总共 239 个,GY、SY、YZ 和 YX 采集水样数分别为 63、61、34 和 81 个。农村人口居住较分散,采样点的设置主要依据主管网及支管网分布特征。

根据《生活饮用水标准检验方法 水样的采集和保存》对水样进行采样与保存,测试水质指标包括 pH、浊度、硬度、总有机碳(TOC)、氟化物等。水质指标按照《水和废水检测分析方法》(第四版)进行分析,pH 和浊度在现场进行测定,其余指标及铝形态的分析在实验室进行。

测定总铝和溶解铝含量前需要对水样进行预处理。原水样用浓硝酸调节 $\text{pH}=1.0$,消解 24 h,用于测定总铝;原水样以 0.22 μm 滤膜过滤,用浓硝酸调节 $\text{pH}\leq 1.0$,消解 24 h,用于测定溶解铝。依据《生活饮用水标准检验方法 金属指标》中规定的电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定总铝与溶解铝含量。每个水样重复测试 3 次,取平均值,加标回收率控制在 80%~120%。

1.2 出厂水主要水质参数

本研究调研的 4 个地区集中式水厂出厂水的主要水质参数见表 1。



表 1 不同地区集中式给水厂出厂水水质特征

Tab.1 Water quality of centralized water supply plants in different areas

参数	pH	COD /mg/L	TOC /mg/L	总硬度 ^① /mg/L	F ⁻ /mg/L	总碱度 ^① /mg/L	总铝 /μg/L	浊度 /NTU
GY	6.67~6.71	3.45~3.87	3.12~4.22	156~158	0.46~0.51	138~163	35~60	0.45~0.67
SY	7.18~7.41	2.34~2.96	3.10~3.35	178~240	0.59~0.68	110~145	100~140	0.25~0.40
YZ	7.21~7.78	1.28~1.34	1.59~2.30	130~168	0.82~1.02	98~110	90~110	0.40~0.60
YX	7.28~7.48	0.71~1.21	1.23~1.66	68~106	0.18~0.19	55~70	45~70	0.10~0.20

注:①总硬度和总碱度均以 CaCO₃ 计。

2 结果与分析

2.1 龙头水总铝含量和浊度

4 个地区的农村用户端龙头水总铝浓度和浊度分布及达标情况如图 1 所示。由图 1 可知, GY、SY 和 YX 3 地均不同程度的存在总铝超标(标准限值为 0.2 mg/L)。由表 1 可知, 上述 3 地出厂水的总铝均低于 200 μg/L, 因此在出厂水达标的情况下管网输配水过程中存在沉积铝释放的现象。其中 SY 采用平流沉淀池, 存在沉淀池、滤池老化等现象, 同时由于原水浊度(60 NTU)较大, 该厂通过增加铝盐混凝剂用量来降低浊度, 使得出厂水残余铝浓度较高, 导致 SY 地区龙头水残余铝容易超标, 因此建议给水厂要严格控制铝盐投加量, 在水厂运行时, 确定最佳投加量时要兼顾余铝和余浊的情况。

GY 和 YX 地区集中式供水厂出厂水总铝低于 70 μg/L, 用户端龙头水总铝在 0~100 μg/L 的比例均高达 77% 以上, 总铝超标率分别为 3% 和 1%。SY 地区农村出厂水总铝在 100 μg/L 以上, 用户端龙头水总铝在 100~200 μg/L 的比例达到 76%, 龙头水总铝超标率高达 14%。由此可见, 在出厂水总铝超过 100 μg/L 时, 用户端可能面临较高的残余铝超标风险。这一结论可为水厂运行提供重要的参考依据, 在实际应用中, 要重点关注超过 100 μg/L 的出厂水残余铝浓度可能带来的风险。

GY 和 SY 地区龙头水总铝超标的情况下浊度也出现了超标现象, 浊度超标率分别为 18% 和 5%, 说明总铝和浊度有一定关系, 但并不是总铝超标率越高, 浊度超标率就越高, 需进一步分析龙头水中残余铝的主要存在形态。

2.2 龙头水中铝的来源及存在形态

为了明确龙头水中残余铝的超标原因及来源, 有必要对水源到龙头残余铝的存在形态进行分析。图 2 为 4 个地区的农村水源水、出厂水和龙头水铝形态

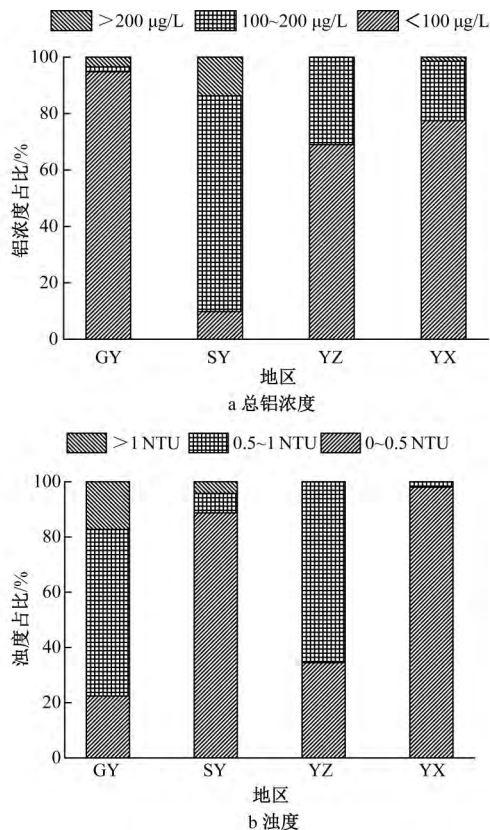


图 1 4 个地区农村用户龙头水总铝浓度与浊度
Fig.1 Total aluminum concentration and turbidity of tap water for rural users in four areas

分布情况, 由图 2a 可知, 4 个地区的集中式给水厂进厂水源水中溶解铝在 3~12 μg/L, 平均为 8 μg/L, 颗粒铝在 38~680 μg/L, 平均为 335 μg/L。因此, 农村用户供水水源中铝主要以颗粒态形式存在, 这些颗粒铝主要以铝土矿(Al₂O₃·nH₂O)、长石(KAlSi₃O₈)、黏土(H₂Al₂(SiO₄)₂·2H₂O)等稳定的矿物形态存在, 不会转化为溶解态铝^[9], 并且颗粒态铝是较容易通过给水管网的常规处理工艺去除掉的。

由图 2b 可知, 4 个地区集中式给水厂出厂水中溶解铝在 20~107 μg/L, 平均为 53 μg/L, 与进厂水

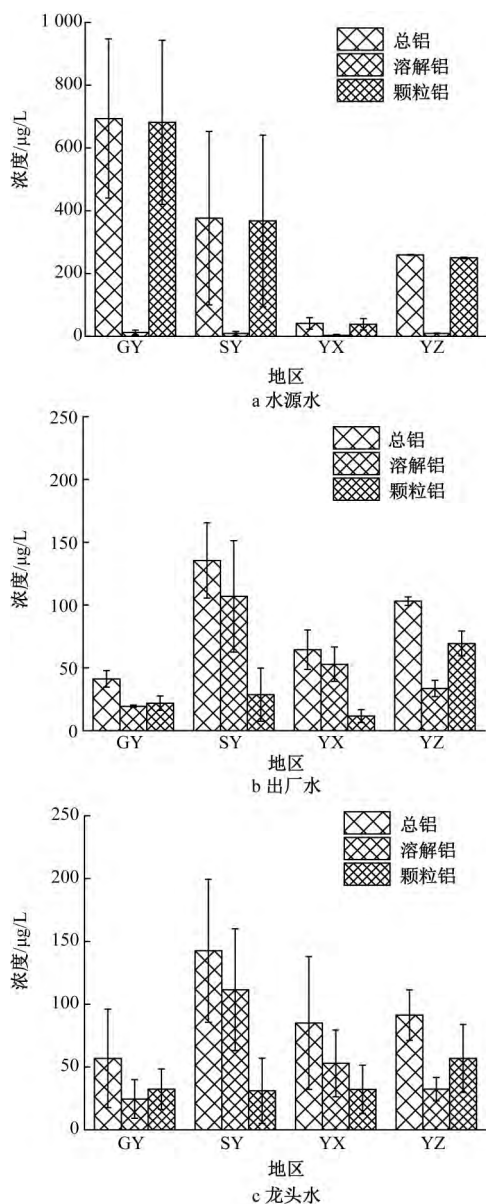


图 2 4 个地区农村用户水源水、出厂水和龙头水铝形态分布情况
Fig.2 Distribution of aluminum forms in source water, finish water and tap water in rural areas

源水相比,各个给水厂出厂水溶解铝平均浓度由 $8 \mu\text{g/L}$ 增加到 $53 \mu\text{g/L}$,溶解铝浓度明显增加。分析原因是调研的 4 个地区均使用聚合氯化铝为混凝剂,出厂水中的溶解铝浓度的增加主要是由于铝盐混凝剂在水处理过程中的残留。4 个地区的集中式供水厂出厂水中颗粒铝在 $11 \sim 69 \mu\text{g/L}$,平均为 $32 \mu\text{g/L}$,说明水源水中的颗粒铝基本被截留去除,未被去除的颗粒铝被带入出厂水。

由图 2c 可知,4 个地区的农村用户端龙头水中颗粒铝在 $31 \sim 57 \mu\text{g/L}$,溶解铝在 $25 \sim 112 \mu\text{g/L}$,与出厂水对比,GY、SY 和 YX 地区龙头水中的颗粒铝和溶解铝浓度都有增加,导致农村用户端龙头水总铝浓度升高。龙头水颗粒铝的升高说明管网输配过程中存在沉积铝释放的现象。由图 1 可知,GY、SY 和 YX 3 地农村龙头水均存在不同程度的总铝超标的情况,且总铝超标率为 4.8% 。在出厂水达标的情况下,超标的残余铝主要来源于管网沉积物中沉积铝的释放^[10]。因此,由水源到龙头残余铝的形态解析可知,饮用水中的残余铝主要来源于铝盐混凝剂在水处理过程中的残留和管网沉积物中沉积铝的释放。

同时,不同地区农村用户端龙头水中残余铝形态存在差异性,GY 和 YZ 农村用户端龙头水残余铝主要以颗粒态的形式存在,YX 和 SY 农村用户端龙头水残余铝主要以溶解态形式存在。龙头水中铝和出厂水中铝的主要存在形态基本一致。YZ 地区龙头水和出厂水中溶解铝的浓度基本不变,与出厂水相比,龙头水中颗粒铝浓度下降导致总铝浓度下降,说明 YZ 地区管网输配过程存在颗粒铝沉积现象,在特定条件下,这些沉积铝会再次释放到饮用水中,引起管网中铝的升高。

2.3 浊度与铝形态的相关性研究

用户端龙头水浊度超标问题比较常见,出厂水中的残余铝颗粒物以及溶解铝在进入管网后继续反应生成的颗粒物均会使水中的颗粒数和浓度增加^[11],管网水浊度的变化与水中积聚的颗粒物密切相关^[12, 13]。因此,浊度与铝浓度之间可能存在一定的关系,分别对总铝、颗粒铝与浊度进行相关性研究,结果如表 2 所示。

由表 2 可知:GY 及 SY 两地中,龙头水水样的总铝及颗粒铝均与浊度存在显著的正相关性 ($P <$

表 2 龙头水不同形态铝与浊度相关性分析

Tab.2 Correlation analysis of turbidity and aluminum in tap water

地点	总铝与浊度		颗粒铝与浊度	
	相关系数	显著性水平	相关系数	显著性水平
GY	0.717**①	0.000	0.778**	0.000
SY	0.442**	0.001	0.673**	0.000
YZ	0.165	0.392	0.218	0.257
YX	0.150	0.198	0.309**	0.007

注:①** $P < 0.01$



0.01), 在 YX 地区, 只有颗粒铝与浊度存在显著的正相关性($P < 0.01$), 这表明浊度在一定程度上反映了颗粒铝的含量^[14]。GY 和 SY 地区龙头水总铝与浊度有显著相关性, 由图 2 可知, GY 地区龙头水铝主要以颗粒铝为主, 总铝主要是由颗粒铝贡献, 而 SY 地区龙头水铝主要以溶解态为主, 总铝主要是由溶解铝贡献, 因此不能以总铝与浊度的相关性来确定铝的主要存在形态。YZ 地区龙头水样中的总铝、颗粒铝均与浊度没有明显的相关性, 可能原因是 YZ 地区存在颗粒铝沉积现象, 同时实际的管网输配系统较复杂, 浊度是多种颗粒物共同作用的结果, 有待进一步深入研究。

2.4 残余铝随距离变化规律

GY 地区龙头水残余铝浓度和浊度较高, 存在总铝与浊度超标的现象, 因此选取 GY 地区为研究对象, 重点分析 GY 农村用户端长距离输水条件下残余铝随输水距离变化规律。GY 地区龙头水中的残余铝主要以颗粒态的形式存在(颗粒态占总铝的比例为 53%~84%), 颗粒铝随距离的变化一定程度上反映残余铝随距离的变化, 因此重点分析颗粒铝随距离的变化。GY 地区农村供水管网主要为枝状管网, 采样点分布情况见图 3a。1 号采样点为出厂水, 2 号~12 号采样点位于主管网, 13 号~15 号采样点位于支管网, 采样点随距离间隔设置, 2 号和 3 号采样点在公路附近, 人口分布较稀疏, 采样点设置较少, 3~12 号采样点人口分布较密, 采样点设置较多。

图 3b 和图 3c 为 2 条主要管网沿途采样龙头水颗粒铝的变化规律。可以看出 2 条管网采样点颗粒铝浓度均高于出厂水的颗粒铝浓度。2 号点位于距离给水厂较近的区域, 由于水流速度快, 颗粒铝的沉积条件不佳, 铝的沉积和释放并不明显, 因此颗粒铝浓度均接近出厂水的水平。在主管网与支管网距离水厂较远的管线, 由于流量的减小, 水力条件较适宜颗粒铝的沉积, 而在检测时突然大量放水的条件下, 形成的水力扰动又会导致原本累积的颗粒铝重新释放到水体中, 因此出现了这些采样点的颗粒铝浓度超过甚至远高于出厂水的现象。主管网与支管网末端龙头水中颗粒铝浓度略高于出厂水, 低于管网线中部水样中残余铝的浓度, 推测原因可能是残余铝在管网输配过程中已逐渐沉积, 管网末端沉积现象

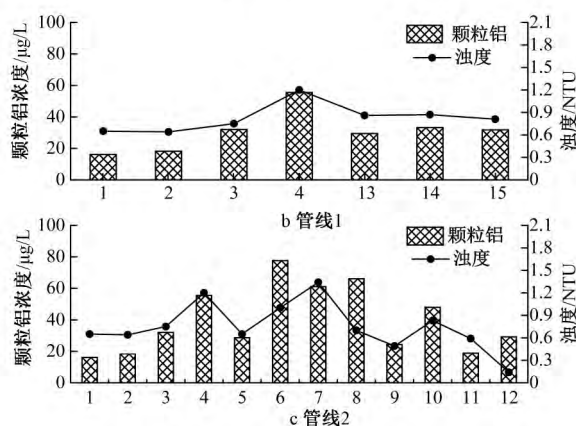
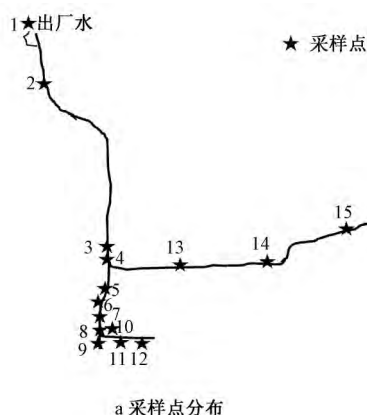


图 3 采样点分布及 GY 地区颗粒铝随输水距离变化规律
Fig.3 Sampling points distribution and variation of particle aluminum in GY with the distance of water delivery

有所缓解。主管网在距离给水厂较近及管网末端区域, 浊度集中在 0.6 NTU 附近, 在管网线中部浊度明显增高, 与颗粒铝的变化趋势表现出正相关关系。支管网所取的 3 个点浊度和颗粒铝浓度变化不大。因此, GY 地区农村用户端残余铝随输水距离呈现先逐渐升高再降低的规律, 残余铝易在输配水管网中部沉积, 沉积物在水力扰动下易发生释放现象。

本文针对城乡一体化供水模式下水源一出厂水一管网水中铝的存在状况调研发现, 出厂水总铝达标的情况下用户端残余铝仍有超标的风险。同时, 残余铝易在管网输配过程发生累积与释放现象。因此, 建议供水企业从以下几个方面采取措施, 以保障用户端铝的稳定达标: 一方面加强水源水质保护, 从源头上减少污染, 降低给水厂处理对混凝剂的需求量; 另一方面, 优化给水厂处理工艺, 提高混凝和过滤效果, 降低出厂水混凝剂残留。此外, 制定适合特



定管网状况的运行维护措施(如不同方式的管道冲洗)也是必要的。

3 结论与建议

(1)城乡一体化供水模式下,4 个地区农村出厂水残余铝均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求,但农村用户端龙头水残余铝超标率仍可达 4.8%。饮用水中残余铝主要来源于管网沉积物的释放与铝盐混凝剂的残留。所以,给水厂应及时维护、更新处理工艺设备,改进给水厂工艺,降低出厂水中残余铝的浓度,减少残余铝形成颗粒物并沉积的风险。

(2)颗粒铝与浊度存在显著的相关性,说明残余铝是龙头水浊度升高的一个重要因素。长距离供水易造成颗粒铝在管网输配过程的沉积,并且在水力扰动下易发生释放现象,引起龙头水总铝与浊度升高。建议加强对供水管网的维护工作,提高对管网的冲洗频率,减少管网沉积物的存量。

参考文献

- [1] Liu G, Zhang Y, Knibbe W J, et al. Potential impacts of changing supply — water quality on drinking water distribution: A review[J]. *Water Research*, 2017, 116: 135—148.
- [2] Husband S, Boxall J. Understanding and managing discolouration risk in trunk mains[J]. *Water Research*, 2016, 107: 127—140.
- [3] Snoeyink V L, Schock M R, Sarin P, et al. Aluminium — containing scales in water distribution systems: Prevalence and composition[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 2003, 52(7): 455—474.
- [4] Zhang Y, Shi B, Zhao Y, et al. Deposition behavior of residual aluminum in drinking water distribution system; Effect of

aluminum speciation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 42(4): 142—151.

- [5] Berthon G. Aluminium speciation in relation to aluminium bioavailability, metabolism and toxicity [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2002, 228(2): 319—341.
- [6] 崔福义, 胡明成, 张燕, 等. 我国部分城市饮用水中铝含量调查[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(1): 5—8.
- [7] 张玥, 石宝友, 宛云杰, 等. 给水管网管垢中铝的分布特征及其来源分析[J]. *给水排水*, 2015, 40(9): 151—156.
- [8] Wang W, Yang H, Jiang J, et al. Aluminum speciation in drinking water distribution system: A case study in north-eastern China[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, 28(5): 1227—1232.
- [9] 黄昌飞. 某净水厂各工艺段出水中铝元素转化规律研究[J]. *净水技术*, 2017, (s1): 22—24.
- [10] 张霄宁. 饮用水处理中残余铝去除的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- [11] Vreeburg J H, Schippers D, Verberk J Q, et al. Impact of particles on sediment accumulation in a drinking water distribution system [J]. *Water Research*, 2008, 42 (16): 4233—4242.
- [12] Vreeburg J H, Boxall J B. Discolouration in potable water distribution systems: a review[J]. *Water Research*, 2007, 41 (3): 519—529.
- [13] 黄源. T 市供水管网浊度特性的研究及其风险评估的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [14] 曲志军, 肖定华. pH 和浊度对水中残余铝的影响研究[J]. *城镇供水*, 2008, (1): 33—36.

§ 通讯处: 100085 北京市海淀区中国科学院生态环境研究中心双清路 18 号

电话: (010)62924821

E-mail: byshi@rcees.ac.cn

收稿日期: 2018—10—20

(上接第 119 页)

- [27] Pinto A J, Schroeder J, Lunn M, et al. Spatial — temporal survey and occupancy-abundance modeling to predict bacterial community dynamics in the drinking water microbiome [J]. *Mbio*, 2014, 5(3): 01135—14.
- [28] 刘帅. 模拟输配水管道中有机物与颗粒物的赋存关系研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2016.
- [29] Zhang J P, Li W Y, Wang F, et al. Exploring the biological

stability situation of a full scale water distribution system in south China by three biological stability evaluation methods [J]. *Chemosphere*, 2016, 161: 43—52.

§ 通讯处: 200092 上海市杨浦区四平路 1239 号同济大学环境科学与工程学院

E-mail: liweiying@tongji.edu.cn

收稿日期: 2018—10—20