

部分城市自来水中典型无机金属元素的达标状况

柳剑男¹, 王文东², 陈志文¹, 李进², 张博翔², 刘宗宽²

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对当前给水管网中出现的无机金属元素超标问题,以36个城市的给水管网为研究对象,在不同时段采集龙头水并利用电感耦合等离子体质谱法对水样中常见无机金属元素进行检测分析,系统评价了现有市政管网中金属元素的达标状况和超标原因,并提出了相应的改善对策。结果表明,在调查范围内,铬、镍、镉、硒、铜和锌6种元素的含量均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。管网高峰水(早上08:30)中的铁、铅和铝以及初流水(凌晨05:30)中的铁超标率达到10%以上。除水源水的贡献外,龙头水中的无机金属含量主要受管材及其使用年限的影响。因此,在提高出厂水水质的基础上,建议通过优化管网运行管理、更换管材等方式控制无机金属元素的超标风险。

关键词: 自来水; 无机金属元素; 给水管网; 管材; 使用年限

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0046-06

Concentrations of Typical Inorganic Metal Elements in Tap Water in 36 Cities

LIU Jian-nan¹, WANG Wen-dong², CHEN Zhi-wen¹, LI Jin², ZHANG Bo-xiang²,
LIU Zong-kuan²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Common inorganic metal elements in tap water of drinking water supply networks in 36 cities at different time of a day were detected and analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP/MS), due to the existence of high concentration inorganic metal elements in the current drinking water supply networks. Pollution conditions of the inorganic metal in the existing municipal pipe network and the reasons for exceeding the standard were systematically evaluated, and the corresponding countermeasures were proposed. The concentrations of chromium, nickel, cadmium, selenium, copper and zinc were all in accordance with the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006). However, concentrations of iron, lead and aluminum in samples obtained during the peak water flow at 08:30 am and concentration of iron in samples obtained during the primary water at 05:30 am exceeded the standard level by more than 10%. Besides the contribution of the source water, the concentrations of inorganic metals in the tap water were also affected by both the material and service life of the pipeline. Therefore, it is suggested to control the risk of inorganic metal elements exceeding the

standard by optimizing the operation and management of the pipeline network and replacing pipe materials on the basis of improving the water quality of the treated water.

Key words: tap water; inorganic metal element; drinking water supply network; pipe material; service life

随着社会的发展,居民饮水安全问题日益突出。无机金属元素尤其是重金属元素因其复杂的水化学特性和生物毒性而备受关注^[1-3]。这些组分可通过结合生物体内蛋白酶上的巯基和二硫键,导致蛋白质变性失活,损害组织细胞的结构和功能而使生物体中毒^[4-5]。许多国家均制定了相应的生活饮用水水质标准,以控制人体对无机金属元素的摄入。然而,居民的日常用水与出厂水水质并非完全相同,送至用户前,饮用水在管网中的停留时间可达1~2 d。大量研究已证实,饮用水在管网滞留期间将发生复杂的物理、化学和生物反应,加之管材溶出的影响,使得无机金属元素超标现象频繁发生^[6-10]。值得注意的是,这些吸附蓄积于管道锈蚀物和管道沉积物中的金属元素的稳定性受管网水质和水力条件的影响较大,供水环境发生变化后,可能出现突发性释放。陈环宇^[11]发现在滞留期过后水力条件变化使得金属离子又会重新释放到水中,引起供水水质波动。同时,随着管网服役年限的增长、金属元素蓄积量的增加,发生重金属二次污染的风险也越大^[12-13]。Taylor等^[14]研究发现,在切换水源后管网中铁的释放量会比之前所观察到的高8倍。但是,现有饮用水调查^[15-16]大多以某个城市或某一地区的饮用水为研究对象,对于较大范围的地域和不同时刻的管网水中金属浓度调查研究较少。本研究主要通过对我国36座城市给水管网中不同时段龙头水进行取样分析,针对12种常见无机金属元素的存在状况进行调查研究,以期对输配水管网系统运行管理和无机金属元素的优化调控提供参考。

1 调查范围与方法

1.1 调查范围

此次调查共涉及24个省、直辖市和特别行政区,覆盖全国36座大、中、小城市。其中西北地区包括西安、延安、西宁、乌鲁木齐和海晏;华北地区包括北京、天津、邢台、太原、原平和赤峰;东北地区包括扶余、大连和沈阳;华中地区包括焦作、周口、南阳和武汉;华东地区包括德州、潍坊、济南、上海、常州、阜阳、肥西、六安、嘉兴、吉安、赣州和福州;华南地区包

括珠海、深圳和香港特别行政区;西南地区包括成都、重庆和昆明。

1.2 样品采集

调查研究在2017年7月—9月集中进行,采集记录包括室内管道材质、使用年限、采集地点、12种目标金属浓度等。在特定城市随机选择采样点,凌晨05:30开启水龙头放流10 min后的自来水视为管网初流出水(初流水),早上08:30再次开启水龙头放水10 min后,所采水样视为高峰期出流水(高峰水),将初流水和高峰水分别收集于聚乙烯瓶中,加硝酸(优级纯)酸化使其pH值 ≤ 2.0 ,于4℃条件下冷藏密封存放。

1.3 检测方法

采用电感耦合等离子体质谱法(ICP/MS, Perkin Elmer Elan-2000)测定水样中砷、铬、镍、镉、铅、硒、铁、锰、铜、锌、铝和汞12种无机金属元素的含量。每个样品在测定前采用0.22 μm滤膜进行预处理,再经pH值=1.0的硝酸酸化后进样测定。各元素的检测误差和加标回收结果如表1所示。

表1 ICP/MS法测定金属元素的精密度和准确度

Tab. 1 Determination precision and accuracy of metal elements by ICP/MS

项目	标准溶液/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	实测浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	方差	相对标准 偏差/%
Se	20.0	22.1	0.3	1.8
Al	80.0	79.7	7.4	2.4
As	5.0	4.6	1.1	16.3
Pb	20.0	20.8	0.3	1.8
Ni	20.0	21.4	0.5	2.3
Cr	60.0	62.5	1.8	1.5
Cd	5.0	4.7	0.1	3.9
Mn	20.0	21.9	0.6	2.5
Cu	20.0	22.5	0.4	1.9
Fe	5.0	5.0	0.3	7.6
Zn	20.0	22.5	0.4	1.9
Hg	5.0	5.0	0	2.4

2 结果与讨论

2.1 室内管道材质与使用年限

本次采样涵盖区域多为旧城区,在所调查的采

样点中,室内供水支管有75%为镀锌钢管,其余25%为聚氯乙烯管材(见表2)。各采样点的管龄在1.5~20年,有55.6%的镀锌钢管使用年限超过10年。所有存在无机金属元素超标的水样中有71.4%采样点的室内管道使用年限在10年以上。镀锌钢

管表层附着力差,易产生局部脱落,进而影响其防腐性能,发生锈蚀^[17]。管材使用年限的增加也会进一步加重管道腐蚀程度。当水力条件发生变化时,管道锈蚀物及其所携带的金属离子可能会释放到水中,使饮用水水质变差。

表2 室内管道材质与使用年限

Tab.2 Material and service life of indoor pipes

城市	室内管材	使用年限/年	城市	室内管材	使用年限/年	城市	室内管材	使用年限/年
太原	镀锌钢管	20	沈阳	镀锌钢管	18	济南	镀锌钢管	17.5
赣州	镀锌钢管	16	延安	镀锌钢管	15	昆明	镀锌钢管	14
香港	镀锌钢管	14	潍坊	镀锌钢管	13	邢台	镀锌钢管	12.5
西宁	镀锌钢管	12	周口	镀锌钢管	12	原平	镀锌钢管	11.5
北京	镀锌钢管	11	六安	镀锌钢管	11	嘉兴	镀锌钢管	11
福州	镀锌钢管	11	大连	镀锌钢管	10.5	阜阳	镀锌钢管	10
焦作	镀锌钢管	9.5	扶余	镀锌钢管	9	天津	镀锌钢管	9
乌鲁木齐	镀锌钢管	8.5	珠海	镀锌钢管	8.5	海晏	镀锌钢管	8
成都	镀锌钢管	7.5	西安	镀锌钢管	7	上海	聚氯乙烯	5
深圳	聚氯乙烯	5	肥西	镀锌钢管	4	赤峰	聚氯乙烯	3.5
吉安	聚氯乙烯	3.5	武汉	聚氯乙烯	3	德州	聚氯乙烯	2.5
重庆	聚氯乙烯	2	常州	聚氯乙烯	2	南阳	聚氯乙烯	1.5

2.2 管网水典型无机金属元素污染现状

在所有随机抽样的城市管网中,铬、镍、镉、硒、铜和锌6种元素的最高浓度分别为33.0、8.3、0.9、4.6、75.2和660.8 $\mu\text{g/L}$,均在饮用水水质标准限值范围内(见表3)。在所调查的金属元素中,铁、铝和

铅为主要污染物,初流水中超标水样占比分别达到11.1%、2.8%和2.8%,高峰供水时段更是高达22.2%、13.9%和11.1%。与铁、铝和铅相比,锰在初流水和高峰水中超标水样占比均小于6%,砷、汞只在高峰水中存在超标现象。

表3 调查水样典型无机金属浓度限值、测定浓度及超标情况

Tab.3 Upper limits, determined values and over-standard situation of typical inorganic metal elements

项 目	标准限值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	水样测定浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)			超标水样 占比/%
		最小值	最大值	平均值	
砷	10.0	0.1 ^a /0.1 ^b	3.2 ^a /11.2 ^b	0.8 ^a /1.5 ^b	0 ^a /5.6 ^b
镉	5.0	0.002 ^a /0.001 ^b	0.1 ^a /0.9 ^b	0.03 ^a /0.1 ^b	0 ^a /0 ^b
铁	300.0	34.9 ^a /54.8 ^b	1 145.8 ^a /1 845.8 ^b	190.9 ^a /229.6 ^b	11.1 ^a /22.2 ^b
铬(六价)	50.0	2.8 ^a /1.2 ^b	4.6 ^a /33.0 ^b	4.1 ^a /5.5 ^b	0 ^a /0 ^b
汞	1.0	0 ^a /0 ^b	0.7 ^a /1.6 ^b	0.1 ^a /0.7 ^b	0 ^a /5.6 ^b
锰	100.0	0.5 ^a /0.8 ^b	432.8 ^a /217.4 ^b	22.0 ^a /14.7 ^b	5.6 ^a /2.8 ^b
镍	20.0	0.4 ^a /0.5 ^b	5.8 ^a /8.3 ^b	1.9 ^a /1.9 ^b	0 ^a /0 ^b
铅	10.0	0.2 ^a /0.1 ^b	17.1 ^a /24.3 ^b	0.9 ^a /3.4 ^b	2.8 ^a /11.1 ^b
硒	10.0	0.1 ^a /0 ^b	4.4 ^a /4.6 ^b	0.5 ^a /0.5 ^b	0 ^a /0 ^b
铝	200.0	5.5 ^a /16.6 ^b	1 803.2 ^a /981.5 ^b	102.6 ^a /162.4 ^b	2.8 ^a /13.9 ^b
铜	1 000.0	0.2 ^a /0.4 ^b	44.9 ^a /75.2 ^b	5.3 ^a /5.6 ^b	0 ^a /0 ^b
锌	1 000.0	0.8 ^a /0 ^b	553.3 ^a /660.8 ^b	62.1 ^a /95.8 ^b	0 ^a /0 ^b

注: a指管网初流水,b指管网高峰水。

2.2.1 铁超标状况分析

在所调查的12种金属元素中,铁超标问题最为严重,最高浓度为1 845.8 $\mu\text{g/L}$,超出饮用水标准限值的515.3%,高峰期出流水样中铁超标水样占比

高达22.2%。所有存在铁超标的水样中,有69.8%的采样点室内管道为镀锌钢管。由于所调查管道的使用年限基本在10年左右(处于老城区),使用年限较长的管道较新铺设管道内壁腐蚀问题对出

质的影响更为严重^[18],当水力条件出现波动时,管网腐蚀物易发生脱落和铁离子的释放,从而导致管网水出现铁超标问题。

2.2.2 铝超标状况分析

初流水中铝的含量为 $5.5 \sim 1\,083.2\ \mu\text{g/L}$,高峰水中铝含量为 $16.6 \sim 981.5\ \mu\text{g/L}$ 。两种水样中铝的最高浓度分别超出饮用水标准限值的441.6%和390.8%,造成铝含量超标的主要原因是现阶段水处理工艺多采用铝盐混凝剂,且形成的絮体沉降性能较差,在有限的水力停留时间内不能在水厂的处理构筑物中完全沉淀或截留去除,使得水体中有一定的铝盐残留。此外,管网使用年限较长时,管网本身形成了含铝管垢^[19],在水力条件变化时表层管垢易溶出。

2.2.3 铅超标状况分析

初流水与高峰水中铅的含量分别为 $0.2 \sim 17.1\ \mu\text{g/L}$ 和 $0.1 \sim 24.3\ \mu\text{g/L}$ 。两种水样中铅的最高浓度分别超出饮用水标准限值的71%、143%。饮用水中铅主要来源于镀锌铁管或含铅的黄铜部件。Lytle等^[20]指出,随管网使用年限增加会出现铅的溶出,且当水中残余氯离子含量上升时也会导致管垢中铅的突然性释放。

2.2.4 锰超标状况分析

在所调查水样中,初流水中锰含量为 $0.5 \sim 432.8\ \mu\text{g/L}$,高峰水中锰含量为 $0.8 \sim 217.4\ \mu\text{g/L}$,两种水样锰的最高浓度分别超出饮用水标准限值的332.8%和117.4%。管网水中的锰元素主要来自水源水,尤其是以地下水为主要供水水源的地区,饮用水处理(除高锰酸盐预氧化外)以及输配水过程对锰含量的贡献相对较小。有研究表明,锰在输配水管网中具有良好的物理蓄积效应^[21],这些蓄积于管网中的锰在氧化还原、水力条件发生变化时可能会释放,出现锰超标问题。

2.2.5 汞、砷超标状况分析

高峰水中汞和砷含量分别为 $0 \sim 1.6\ \mu\text{g/L}$ 和 $0.1 \sim 11.2\ \mu\text{g/L}$,最高浓度分别超出饮用水标准限值的60%和12%。汞主要来自于水源水,具有良好的沉积性能,但水动力条件的改变可以抑制可溶态汞的沉降,导致其高峰水中的含量偏高。除水源水的贡献外,供水管材对水中砷含量也有一定贡献。

2.3 各地域典型无机金属元素分布现状

室内管材使用年限高于10年的城市管网水中

12种金属离子浓度如图1所示,室内管材使用年限低于10年的城市管网水中12种金属离子浓度如图2所示(城市后面的1和2分别代表初流水和高峰水)。在所调查的城市中,潍坊市高峰水样中超标金属元素高达5种,北京市、珠海市、周口市高峰水样中超标金属元素也达到3种,潍坊市、周口市初流水样中铁元素也存在超标现象。珠海市(沿海地区)因地质侵蚀、风化和海水倒灌等问题,使得水体受到不同程度的污染。北京市调查区域的管材为镀锌钢管且使用年限长达11年,使用年限较长时镀锌钢管会发生管材腐蚀及溶出现象,管网腐蚀物在用水高峰期溶出导致铁、铝和铅出现超标现象。周口市管网水中金属元素超标原因与北京市类似。此外,周口市的管道锈蚀可能更为严重,使得初流水中铁元素含量也超出饮用水水质标准限值。潍坊市除了与北京市、周口市在管材以及使用年限上相似以外,该地区化工业较为发达,可能造成水源水中无机金属元素的本底值偏高,在管道锈蚀物的蓄积和水力冲刷释放的双重作用下,造成高峰水中多种金属离子超标。

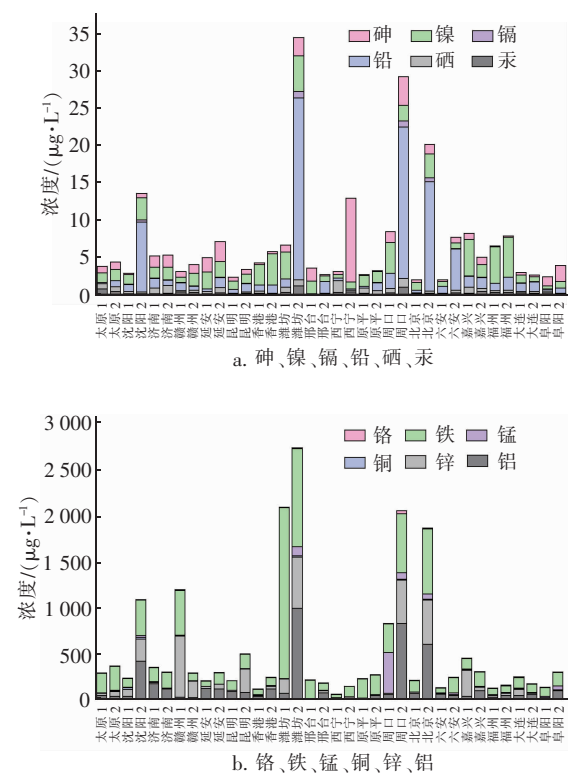


图1 管材使用年限大于10年的管网水中金属元素含量

Fig.1 Contents of typical metal elements in the pipelines with service life of more than ten years

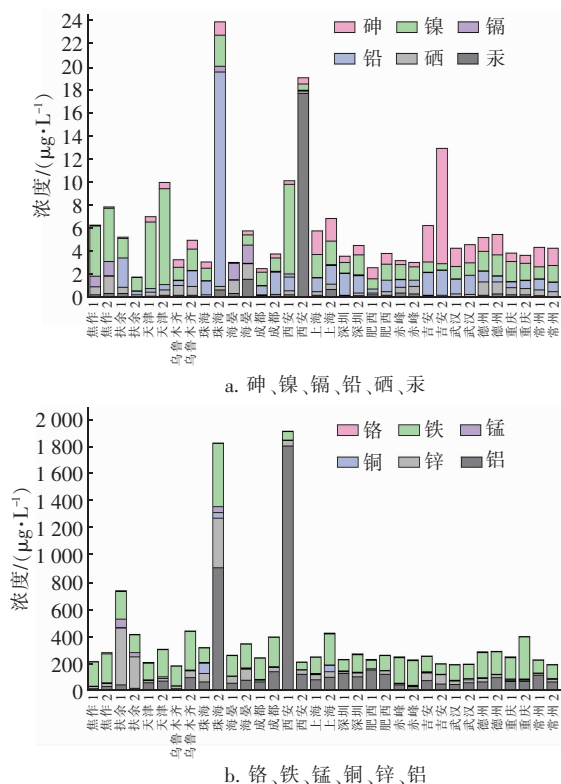


图2 管材使用年限低于10年的城市管网水中金属元素含量

Fig. 2 Contents of typical metal elements in the pipelines with service life of less than ten years

2.4 两个时段管网水中典型无机金属含量对比

对两个时段的水样进行统计分析可以发现,60%以上的城市管网初流水中镍、镉、硒、铁、锰、铜、锌和汞浓度均低于其高峰水浓度,70%的管网初流水中砷、铅和铬浓度低于高峰水中的浓度(见图1、2)。产生这种现象的主要原因是:管网水在夜间的流速较低,甚至存在滞留现象,使得初流水的停留时间与高峰时段的管网水相比明显增加;长时间的停留有助于无机金属元素在管道锈蚀物等固相界面的吸附。水力冲刷作用虽不会改变无机金属元素与锈蚀物等吸附介质间的作用强度,但可造成吸附介质的脱落以及少量弱吸附(物理吸附)金属离子的释放,使得管网高峰水中金属离子含量普遍偏高。

3 结论

针对无机金属元素在给水管网中的蓄积问题以及水质和水力状况变化后出现突发性释放的风险开展了系统的调查研究,在调查的12种金属元素中,铬、镍、镉、硒、铜和锌在城市供水管网中不存在超标问题,铁、铝、铅、锰、砷和汞6种元素出现超标现象;不同时段管网水中金属含量有明显的差异;铁、铝、

铅、锰、砷和汞在饮用水中的高含量与采样点的管材、使用年限以及管网的水流状态密切相关。建议通过控制铝盐混凝剂残留量、更换老旧管道、优化管材以及加强检测管理来控制饮用水中无机金属尤其是重金属元素的超标问题。

参考文献:

- [1] Tomljenovic L. Aluminum and Alzheimer's disease: after a century of controversy, is there a plausible link? [J]. J Alzheimers Dis, 2011, 23(4): 567-598.
- [2] Bondy S C. The neurotoxicity of environmental aluminum is still an issue [J]. Neurotoxicology, 2010, 31(5): 575-581.
- [3] Batayneh A T. Toxic (aluminum, beryllium, boron, chromium and zinc) in groundwater: health risk assessment [J]. Int J Environ Sci Technol, 2012, 9: 153-162.
- [4] 朱贤英. 论有毒重金属污染对人体健康的危害及饮水安全 [J]. 湖北教育学院学报, 2006, 23(2): 72-74.
- Zhu Xianying. Heavy metal pollution's harm to our health & the safe of drinking water [J]. Journal of Hubei Institute of Education, 2006, 23(2): 72-74 (in Chinese).
- [5] 张晋, 张妍, 吴星. 天然水中重金属化学形态研究进展 [J]. 现代生物医学进展, 2006, 6(5): 38-40.
- Zhang Jin, Zhang Yan, Wu Xing. Speciation analytical methods of heavy metals in natural waters [J]. Progress in Modern Biomedicine, 2006, 6(5): 38-40 (in Chinese).
- [6] 高玖黎. 供水管道铁释放现象影响因素研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Gao Jiuli. Research of Influencing Factors on Iron Release in Water Distribution System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese).
- [7] 杨帆, 石宝友, 王东升, 等. 水质化学组分变化对管道铁释放及管垢特征的影响 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(23): 59-64.
- Yang Fan, Shi Baoyou, Wang Dongsheng, et al. Effect of water chemistry changes on iron release and corrosion scale properties of old cast iron pipes [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(23): 59-64 (in Chinese).
- [8] 梁好, 盛选军, 刘传胜. 饮用水安全保障技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- Liang Hao, Sheng Xuanjun, Liu Chuansheng. Drinking

- Water Safety Assurance Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007 (in Chinese).
- [9] 王洋, 张晓健, 陈超, 等. 水源切换引起给水管网黄水问题原因分析[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3555 – 3561.
- Wang Yang, Zhang Xiaojian, Chen Chao, *et al.* Case study of red water phenomenon in drinking water distribution systems caused by water source switch[J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3555 – 3561 (in Chinese).
- [10] Yang F, Shi B, Gu J, *et al.* Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a drinking water distribution system [J]. Water Res, 2012, 46(16): 5423 – 5433.
- [11] 陈环宇. 供水管网管垢污染物的累积释放规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Chen Huanyu. Accumulation and Release of Contaminants in Pipe Scale of Drinking Water Distribution System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese).
- [12] Peng C Y, Hill A S, Friedman M J, *et al.* Occurrence of trace inorganic contaminants in drinking water distribution systems[J]. J AWWA, 2012, 104(3): 181 – 193.
- [13] Swietlik J, Raczky-Stanislawiak U, Piszora P, *et al.* Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts[J]. Water Res, 2012, 46(1): 1 – 10.
- [14] Taylor J S, Dietz J, Randall A A, *et al.* Impact of RO-desalted water on distribution water qualities[J]. Water Sci Technol, 2005, 51(6/7): 285 – 291.
- [15] 袁新龙, 胡锋. 伊犁河流域城镇饮用水中重金属健康风险评估[J]. 干旱环境监测, 2018, 32(2): 62 – 65, 87.
- Yuan Xinlong, Hu Feng. Health risk assessment of heavy metals for urban drinking water in Yili River Basin [J]. Arid Environmental Monitoring, 2018, 32(2): 62 – 65, 87 (in Chinese).
- [16] 高继军, 刘玲花, 周怀东, 等. 北京地区饮用水重金属污染物浓度分布研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(z1): 436 – 439.
- Gao Jijun, Liu Linghua, Zhou Huaidong, *et al.* Research on heavy metals concentrations distributions in drinking water of Beijing City[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(z1): 436 – 439 (in Chinese).
- [17] 周韬, 施周, 方伟, 等. 输配水镀锌钢管内壁腐蚀瘤物化特性研究[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2006, 20(3): 8 – 11.
- Zhou Tao, Shi Zhou, Fang Wei, *et al.* Investigation of physico-chemical characteristics of tubercles in galvanized pipes for drinking water distribution [J]. Journal of Nanhua University: Science & Technology, 2006, 20(3): 8 – 11 (in Chinese).
- [18] 黄纯凯, 赵鹏, 张宏伟, 等. 给水管道腐蚀管垢的特征分析[J]. 给水排水, 2011, 37(9): 155 – 159.
- Huang Chunkai, Zhao Peng, Zhang Hongwei, *et al.* Analysis of the characteristics of corrosion scale in water supply pipe [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(9): 155 – 159 (in Chinese).
- [19] 张小妮. 给水管网中典型铝垢对重金属吸附释放特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- Zhang Xiaoni. Study on the Adsorption Characteristics of Aluminum-containing Scales to Heavy Metals in Drinking Water Distribution System[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011 (in Chinese).
- [20] Lytle D A, Schock M R. Formation of Pb(IV) oxides in chlorinated water[J]. J AWWA, 2005, 97(11): 102 – 114.
- [21] 岳强. 金属元素在水质净化及输配过程中的去除规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- Yue Qiang. Removal Characteristic of Metal Elements in Drinking Water Purification and Distribution Processes[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016 (in Chinese).



作者简介: 柳剑男(1995 –), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为给排水系统优化和安全输配技术。

E-mail: 825040869@qq.com

收稿日期: 2019 – 08 – 12