

Distribution of Metal Ion Content in Water Bodies in High-Density Population Areas and Its Potential Association with Water Heater Life

Yanxue Lin¹, Yaqi Shi¹, Guoping Xu², Xiaojie Liu¹, Xianguo Li¹, Dahai Zhang^{1*}

¹College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Wuhu Midea Kitchen and Bathroom Appliance Manufacturing Corporation Limited, Wuhu Anhui

Email: *dahaizhang@ouc.edu.cn

Received: Apr. 18th, 2019; accepted: May 3rd, 2019; published: May 10th, 2019

Abstract

Central and eastern China is a densely populated area with very scarce water resources. The residents' daily water consumption mainly depends on tap water. The water quality difference in different areas is obvious. The difference of water quality parameters of tap water directly leads to the extremely short life of water heaters in some areas. This paper collects tap water in high-density population as the research object. By analyzing the metal ion types and contents in tap water, the paper tries to explore its impact on water heater's life. The contents of 8 kinds of metal ions such as Cu, Co, Cr, Cd, Ni, Mn, Pb and Zn in 155 tap waters of 31 urban areas in 9 provinces were determined by ICP-AES. The results show that the concentration of metal ions in the water samples is in line with the GB5749-2006 standard, and the concentration distribution has no obvious law. Principal component analysis found that most of the metal ions in tap water are derived from industrial wastewater, fertilizers and pesticides, as well as the combustion products of gasoline in ships in rivers. There is no significant correlation between the metal ions in the tap water and the damage rate of the water heater, but the damage to the inner stainless steel cannot be ignored.

Keywords

Tap Water, Metal Ion, ICP-AES, Principal Component Analysis, Water Heater Damage Rate

高密度人口区域水体中金属离子含量分布及其与热水器寿命的潜在关联

林艳雪¹, 史雅琦¹, 徐国平², 刘晓杰¹, 李先国¹, 张大海^{1*}

*通讯作者。

文章引用: 林艳雪, 史雅琦, 徐国平, 刘晓杰, 李先国, 张大海. 高密度人口区域水体中金属离子含量分布及其与热水器寿命的潜在关联[J]. 分析化学进展, 2019, 9(2): 85-94. DOI: 10.12677/aac.2019.92012

¹中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛

²芜湖美的厨卫电器制造有限公司, 安徽 芜湖

Email: dahaizhang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019年4月18日; 录用日期: 2019年5月3日; 发布日期: 2019年5月10日

摘要

中国中东部是人口密集区, 水资源非常紧缺, 居民的生活用水主要依赖于自来水。不同地区的水质差异性明显, 自来水的水质参数的不同直接导致一些地区的水热水器寿命极短, 本文以高密度人口区域自来水为研究对象, 通过分析自来水中的金属离子种类和含量, 尝试探讨其对热水器寿命的影响。用ICP-AES法测定了9个省份31个市区的155份自来水中的Cu、Co、Cr、Cd、Ni、Mn、Pb、Zn等8种金属离子的含量。结果表明测试地区的水样中金属离子的浓度均符合GB5749-2006标准, 浓度分布无明显规律。通过主成分分析发现, 自来水中的金属离子大多来源于工业废水、化肥和农药以及河流中的船只的汽油燃烧产物等。自来水中的金属离子与热水器的损坏率没有显著的相关性, 但对内胆不锈钢的损坏作用不能忽略。

关键词

自来水, 金属离子, ICP-AES, 主成分分析, 热水器损坏率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在城镇化战略、特色小镇战略、乡村振兴战略等多重政策利好的影响下, 奥维云网 AVCS 数据显示, 2018 年第一季度热水器的销售额为 180 亿元, 尤其是三四线市场热水器市场逐步崛起[1], 但是部分地区出现了严重的水热水器损耗问题[2]。储水式热水器因满足了部分居民在沐浴舒适方面的要求, 在家电市场占有了一席之地[3]。储水式热水器主要由电热管、内胆、温控开关、漏电保护器、限压阀、混水阀及接地装置等组成[4]。其中, 内胆是热水器的关键部件, 热水器的寿命主要取决于内胆的使用寿命, 而内胆的寿命又由制作工艺、材质和阴极保护效果决定。目前搪瓷内胆已经大份额占据热水器市场, 其原理是内胆表面的非金属材料搪瓷可将水与不锈钢内胆隔绝, 但随时间延长, 在焊接不均匀处会发生晶间腐蚀、焊缝腐蚀, 水中的 Cl⁻ 等阴离子也会导致搪瓷内胆的孔蚀和应力腐蚀等[5], 这些腐蚀的类型都可能导致内胆的渗漏[6]。

搪瓷内胆的主要材质为不锈钢。有研究指出, 微量的金属离子对不锈钢的腐蚀有着至关重要的作用。唐灿等人指出氯化锌、氯化铅以及两种氯盐混合物都对不锈钢有腐蚀作用[7]。然而有研究人员, 在城市地区的雨水径流中检测到众多金属元素, 包括铜铅锌镉等金属元素, 而城市雨水径流能够反应城市水体的污染情况[8] [9] [10]。因此本研究调研了中国热水器损坏率高的地区自来水中微量金属的浓度分布情况, 测定了自来水中的 Cu、Co、Cr、Cd、Ni、Mn、Pb、Zn 在调研地区的浓度, 分析了自来水中的金属离子间的相互作用及其与热水器内胆损坏率的关系。

2. 实验部分

2.1. 样品的采集与处理

储水式热水器主要集中分布于我国人口密度较高的北部地区，因此本研究在中国的中东部人口密集地区的 9 个省份，共设置了 31 个采样城市，包括：陕西省宝鸡市、渭南市，吉林省的延吉市、白山市，辽宁省的营口市、丹东市，黑龙江省的佳木斯市，山东省的烟台市、潍坊市、淄博市、济宁市，山西省的吕梁、商丘、临汾、运城、朔州，河南省的安阳，三门峡、鹤壁、洛阳、安阳、焦作、郑州、周口、许昌、舞钢，河北省的保定、邯郸，宁夏回族自治区的平凉、酒泉、石嘴山。每个城市均设置 5 个采样点，主要在该城市的火车站，商场等地点，让所采集的样品尽量能够代表该城市的自来水水平，具体信息如图 1 所示。



Figure 1. City station site of water samples
图 1. 水样采集的城市站点

2.2. 主要仪器与试剂

电感耦合等离子体原子发射光谱仪：Thermo ICAP-6300 型，美国 Thermo Fisher 公司；仪器所用的氩气的纯度为 99.999%。

实验过程中采用混合标准溶液为 ICP 多元素标准溶液 4，出自百灵威科技公司，规格为 1000 $\mu\text{g/L}$ ；实验过程中的盐酸、硝酸均为优级纯；实验用水为去离子水。

2.3. 仪器工作条件

射频功率：1150 W 冷却气流量，12 L/min 辅助气流量，0.5 L/min 雾化气流量，0.5 L/min 的积分时间，短波 15 s，长波 5 s；各元素的分析波长见表 1。

Table 1. Analysis wavelength of elemental

表 1. 元素分析波长

元素	分析波长/nm	元素	分析波长/nm
Cu	224.7	Pb	220.3
Co	228.6	Zn	213.8
Cr	267.7	Ni	231.6
Cd	228.8	Mn	260.5

2.4. 工作曲线绘制

取 5 个用硝酸(1 + 1)溶液浸泡 24 h 的 100 mL 容量瓶, 用盐酸(15 + 85)溶液将含有 Cu、Co、Cr、Cd、Ni、Mn、Pb、Zn 的混合标准储备溶液稀释, 配成系列标准溶液, 在仪器的工作条件下, 对空白溶液、标准溶液和样品进行测定。

2.5. 主成分分析法

主成分分析方法的目的是之一就是把多指标转化为少数的综合指标(即主成分), 其中每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息, 且所含信息不重复。本研究中的主成分分析法是将所研究的 8 种金属元素, 降维成为更少的变量, 便于进一步分析。

3. 结果与讨论

3.1. 调研城市的金属浓度分布情况

由测试结果可知, 调研城市的自来水中金属含量均符合国家标准(GB5749-2006), 但不同区域的金属浓度仍存在明显的差异性。具体的浓度分布情况如图 2 所示。金属 Cu、Co、Cr 分布比较分散。运城市、安阳市、平凉市、营口市 Cu 浓度相对高; 丹东市、吕梁市、邯郸市、石嘴山市的 Co 浓度较高, 横跨四个省份; 山东省的 Cr 分布浓度相对较低, 其他省份分布都比较均衡。金属 Pb、Zn、Ni、Cd、Mn 的分布向对较为集中。保定市、安阳市、洛阳市、许昌市的 Pb 浓度较高, 主要分布在河南省与河北省; 山西省临汾市的 Zn 浓度相对于其它地区, 浓度较高, 佳木斯市、临汾市的 Ni 浓度相对较高, 涉及山西省与黑龙江两个省份; 宁夏回族自治区平凉市的 Cd 浓度相较于其他地区, 浓度较高; 吉林省白山市的 Mn 浓度, 相较于其他地区, 浓度较高。

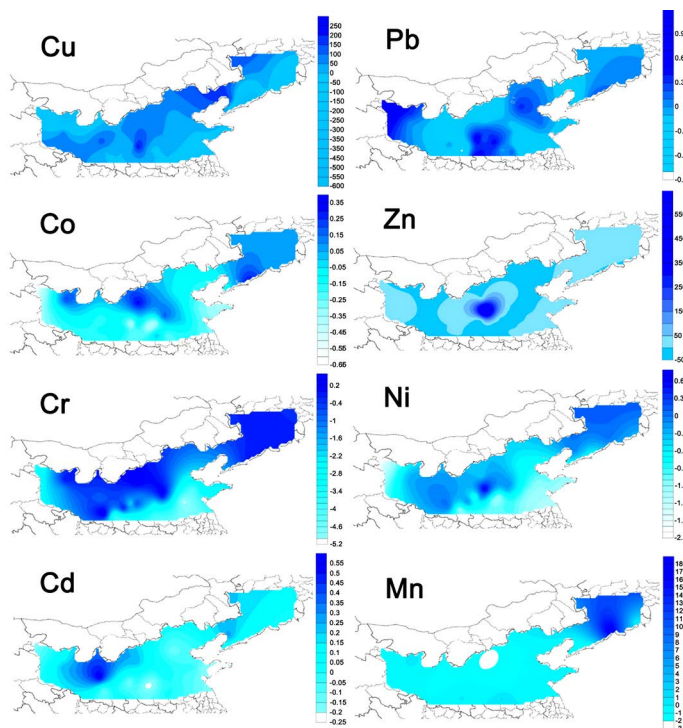


Figure 2. The distribution of metal concentration
图 2. 金属浓度分布

根据水中的金属浓度分布情况,可知,山西省的 Cu, Co, Zn, Ni 相较于其他省份都比较高。山西省参与调研的城市有吕梁、临汾、运城、朔州。吕梁市作为经济社会快速发展的区域,面临着较为紧迫的水资源压力。随着工业和城市的发展,未经处理的大量工业废水和生活污水的排放以及农业生产中农药和化肥的大量使用,对水环境造成了严重的污染[11]。河水的污染既影响地表水,也影响地下水。以吕梁柳林泉水为例,被污染的河水会通过渗漏段带入地下水中,使地下水受到污染[12]。另外,临汾市的主要水源之一是龙子祠泉,由于煤矿的大规模开采、采石、炼焦、炼铁、烧灰等人为因素,对地下水环境造成了一定程度的影响,进而导致龙子祠泉流量下降,水质受到污染,水环境遭到巨大影响[13]。运城市水资源目前面临着水资源不足、地下水过量开采、水资源污染严重、水利工程超龄运行、以及水资源浪费严重等问题。由于运城市缺少污水处理设施建设,导致河段严重污染,以涑水河永济段为主,河段附近的 300 眼地下水井遭到废弃,造成了该河段附近的工业,农业,饮水等供水水源的瘫痪。此外,水利工程、水库设施、设备的超龄运行[14],也会使设施中的重金属浸出导致水质下降[15]。朔州市也同样存在着地下水污染严重,过量开采等问题[16]。综上所述,这可能是山西省的饮用水中金属含量较高于其他省份的主要原因。

3.2. 自来水中金属离子的来源分析

3.2.1. 相关性分析

主成分分析的目的之一就是用量少的因子来描述多种指标或者因素之间的关系。在主成分分析时,首先要对变量进行相关性分析,表 2 为 8 个重金属变量之间的相关系数矩阵[17]。

Table 2. Correlation matrix of heavy inter-metal

表 2. 重金属间相关性矩阵

元素	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	Co	Cd
Mn	1.000	0.029	0.233	0.010	-0.060	0.122	0.152	0.096
Cu		1.000	0.167	-0.181	0.159	-0.119	-0.304*	0.157
Ni			1.000	-0.254	0.415*	0.759*	0.608*	0.545*
Pb				1.000	0.117	-0.061	-0.410*	-0.442*
Zn					1.000	0.038	0.081	0.051
Cr						1.000	0.544*	0.317*
Co							1.000	0.498*
Cd								1.000

由表 2 可知 Cd 与 Co、Cr 和 Ni 元素含量的变化显示出显著相关,表明四者可能有相同来源。Co 与 Ni、Cr, Zn 与 Ni 元素含量也存在正相关的关系,同样说明,它们可能分别具有相同来源。而 Cd 与 Pb, Co 与 Cu、Pb 元素含量的关系则为负相关,这表明在自来水中的金属离子浓度具有一定的拮抗性。

3.2.2. 主成分分析

从主成分分析的结果中提取 4 个有效主因子,因子成分如表 3,表 4 所示,因子 1 主要由 Ni、Co、Cd、Cr 四种元素构成,其方差贡献占总方差的 36.4%,地表水水体中的 Cd 主要来源于工业废水,其次是排入水体的含 Cd 矿渣;而地下水中的 Cd 主要来源于化肥和农药[18]。Co 主要广泛应用于合金、颜料、催化剂、电子产品以及电动汽车等工业当中[19] [20]。Cr 和 Ni 均是电镀废水中重要的重金属种类,电镀是一种通用性强、应用面广的表面处理工艺[20],因此因子 1 代表工业废水以及农业污染所带来的污染源;因子 2 的构成元素为 Cu,其方差贡献占总方差的 16.8%,水体中的铜离子主要来源于钢铁、机械制造等工业废水,因此因子 2 代表钢铁、机械制造类的工业废水所带来的污染源[21] [22]。

Table 3. Component score coefficient matrix
表 3. 成份得分系数矩阵

因子	成份			
	1	2	3	4
Mn	0.086	-0.080	0.066	0.907
Cu	0.011	0.667	-0.065	0.230
Ni	0.312	0.113	0.239	0.033
Pb	-0.163	-0.168	0.565	0.130
Zn	0.079	0.339	0.536	-0.277
Cr	0.256	-0.213	0.221	0.008
Co	0.280	-0.261	-0.081	-0.145
Cd	0.249	0.152	-0.257	-0.035

Table 4. Total variance of interpretation
表 4. 解释的总方差

成份	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	2.913	36.412	36.412	2.913	36.412	36.412
2	1.344	16.806	53.218	1.344	16.806	53.218
3	1.260	15.756	68.974	1.260	15.756	68.974
4	1.008	12.606	81.581	1.008	12.606	81.581
5	0.699	8.740	90.321			
6	0.484	6.048	96.368			
7	0.220	2.754	99.123			
8	0.070	0.877	100.000			

因子 3 主要包括 Pb、Zn 两种金属，其方差贡献占总方差的 15.8%，有报道指出，交通运输会产生重金属污染，Pb 主要源于含有铅的汽油的燃烧[23] [24]。在汽车轮胎摩擦产生的粉尘，在路的两侧土壤中，污染物以 Pb, Zn, Cd 为主[25]，因此因子 3 代表交通运输所带来的污染源。因子 4 主要由包括金属 Mn，其方差贡献占总方差的 12.6%，Mn 主要来源是工业废水[26]，在锅炉用水中，较高含量的锰会造成结垢，影响传热效率，甚至会造成管炸裂[27]，因此，因子 4 代表源于工业废水带来的污染源。综上所述，当自来水来源于地表水时，其重金属主要来源于电镀、机械制造等的工业废水的排放以及船只的燃料燃烧，而地下水的重金属主要来源于化肥和农药的使用。

将主成分的因子得分作为新变量，与采集自来水样品的市区相结合作图可知，PC1 主要集中在山西吕梁，黑龙江佳木斯，吉林延吉、白山，辽宁丹东，分布比较广，这可能由于因子 1 的影响元素比较多，且金属离子本身的分布就不成规律性所导致；PC2 主要集中在山西吕梁、朔州，宁夏平凉，辽宁营口，分布较广，这可能与铜本身的应用比较广泛有关；PC3 主要集中在山西临汾，河南安阳，宁夏平凉，这可能由于三个城市受自然环境、城市的污水管网不健全等因素的影响，导致水资源短缺、工业废水直排或未达标排放[28] [29] [30]；PC4 主要集中在吉林白山，这主要由于鸭绿江流域流经的各城市(包括白山市)流经的江段的水质下降，城市缺乏水处理设施，导致水中的高锰酸盐指数等指标较高[31]。

3.3. 自来水中的金属离子与热水器的损坏率关系探究

根据某品牌热水器的损坏率寿命统计调查：参与调研的 9 个省份的损坏率趋势如图 3 所示。

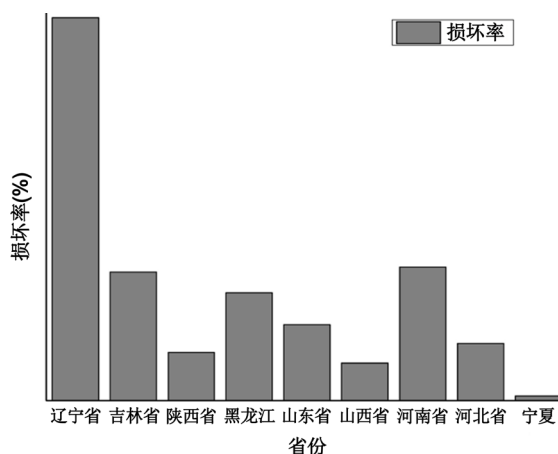


Figure 3. The water heater damage rate in the province

图 3. 调研省份热水器损坏率图

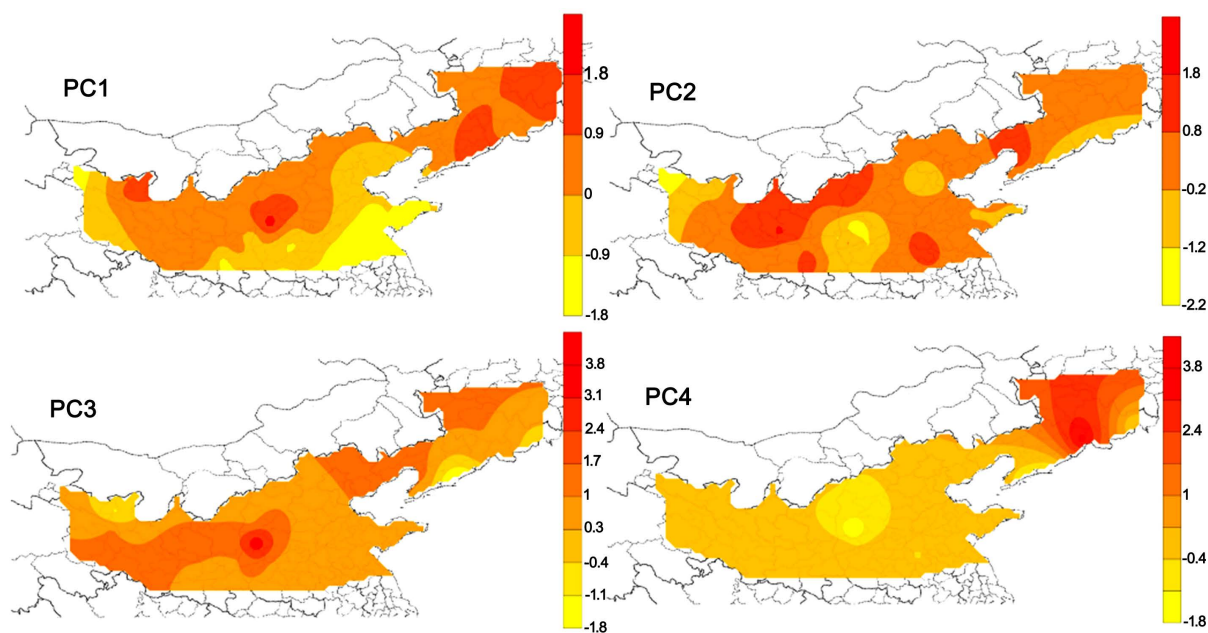


Figure 4. The distribution of factor score

图 4. 因子得分分布图

数据显示,辽宁省的损坏率最高。根据图4主成分得分的分布图可知,PC1和PC2都涉及到辽宁省,所包含的金属元素是Ni,Co,Cd,Cr和Cu。由此可以看出,PC1与PC2包含的金属离子有可能会加速热水器的损坏,缩短热水器的寿命。但不能确认自来水中的金属离子为热水器内胆损坏的主控因素。这主要是因为自来水中,除金属离子外,还包含 Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等其它离子参数,所以热水器的寿命不能仅关注金属离子的影响。此外,同一省份的不同城市热水器损坏率,差异较大,所以,几个城市的水器损坏率并不能够代表一整个省的损坏率,如图5所示。

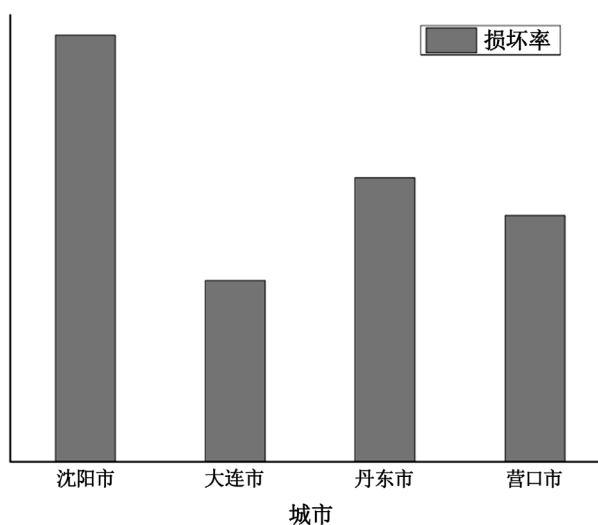


Figure 5. The city's water heater damage rate of Liaoning Province

图5. 辽宁省参与调研城市热水器损坏率

尽管,局部区域的某一种金属浓度,不能说明其为影响热水器寿命的主控因素,但是,我们也不能忽略水中的金属的存在,确实影响热水器的寿命。张蔚,朱江龙指出,当锅炉用水的铁锰含量较高时,会造成锅炉底部结垢,从而影响锅炉的传热效率,影响正常生产,用于冷却水时,铁锰结垢会使管壁变厚,影响传热效率,甚至会造成管炸裂[32]。也有文章指出,在相同的实验条件下,氯化铅、氯化锌以及两种氯盐的混合物对不锈钢的腐蚀程度强弱为氯盐的混合物 > 氯化锌 > 氯化铅[7]。综上所述,水中的微量的金属离子会与水中的其他水质参数(以氯离子为例)起到协同的作用,共同加速不锈钢的腐蚀,导致热水器内胆的损坏,缩短电热水器的寿命。

4. 结论

根据调研的城市中自来水中的重金属分布情况,可以得知,所测试的所有水样中的重金属浓度均符合国家标准 GB5749-2006。此外,山西省的Cu,Co,Zn,Ni相较于其他省份都比较高。这与山西省的煤矿大规模开采、采石、炼焦、炼铁等发达的工业活动有关。

根据主成分分析结果可知,当自来水来源于地表水时,水中的微量重金属的主要来源于电镀、机械制造等的工业废水的排放以及船只燃料的燃烧,而水源是地下水时,其重金属主要来源于化肥和农药的使用。

由于自来水中存在 Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等其他不可忽略的影响因素,因此,现有数据不能直接证明自来水中的金属离子与热水器的损坏率之间存在明显的相关关系,但自来水中的金属离子有加速热水器损坏的可能性,这一点仍无法忽视。自来水中存在的金属离子可能会促使结垢,管炸裂,或者与其它离子起协同作用,与单因素条件相比,协同作用更能够加速不锈钢的腐蚀,进而导致电热水器内胆的损坏,缩短热水器的寿命。

参考文献

- [1] 李曾婷. 热水器: 市场稳步增长, 产业结构持续优化[J]. 电器, 2018(5): 40.
- [2] 卢淑霞. 内胆漏水整改分析研究[C]//中国家用电器协会. 2016 年中国家用电器技术大会论文集. 北京: 《电器》杂志社, 2016: 6.
- [3] 王兴国. 搪瓷用钢 BTC330R 电热水器水箱焊接技术研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- [4] 伍玩秋. 电热水器触电事故的原因与防范分析[J]. 日用电器, 2018(5): 20-23.
- [5] 房中学, 符永高. 电热水器内胆腐蚀机理及实施阴极保护综述[J]. 家用电器科技, 2002(2): 41-43.
- [6] 薛磊明. 延长热水器内胆寿命保护电路的探索[J]. 电子制作, 2013(14): 231.
- [7] 唐灿. 铅、锌氯化物共存条件下 1Cr18Ni9Ti 不锈钢高温腐蚀机理[C]//中国化学会. 中国化学会第 30 届学术年会摘要集 - 第四十六分会. 北京: 中国化学会, 2016: 1.
- [8] Davis, A.P., Shokouhian, M. and Ni, S. (2001) Loading Estimates of Lead, Copper, Cadmium, and Zinc in Urban Runoff from Specific Sources. *Chemosphere*, **44**, 997-1009. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00561-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00561-0)
- [9] Sansalone, J.J. and Buchberger, S.G. (1997) Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water. *Journal of Environmental Engineering*, **123**, 134-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1997\)123:2\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1997)123:2(134))
- [10] Barrett, M.E., Irish Jr., L.B., Malina Jr., J.F., et al. (1998) Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Area. *Journal of Environmental Engineering*, **124**, 131-137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:2(131))
- [11] 冯霄, 付贵, 刘海娟. 当前吕梁市水资源面临的问题及对策[J]. 地下水, 2014, 36(3): 129-143.
- [12] 李健. 柳林泉水的重要地位、存在问题与对策[J]. 山西水利科技, 2009(2): 69-70.
- [13] 赵慧斌. 龙子祠泉岩溶水污染成因及防治对策[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(17): 179-180+193.
- [14] 谢莉. 基于运城市节水的农业水资源流转及建议探究[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(11): 36-38+156.
- [15] 洪泽浩, 黄子东, 李杰龙, 等. 不锈钢餐具浸泡茶水时的重金属迁移量情况研究[J]. 中国标准化, 2018(11): 124-128+133.
- [16] 丁丽萍. 朔州市水资源保护规划方案要点[J]. 山西水土保持科技, 2016(4): 4-7.
- [17] 马挺军, 林炳荣, 贾昌喜. 再生水中重金属元素聚类分析和主成分分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 318-321.
- [18] 王旭. 小清河沉积物重金属生态风险评价及管理对策研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [19] 吴阁格. 磁性壳聚糖富集-FAAS 法检测水中的钴[C]//中国化学会. 中国化学会第 30 届学术年会摘要集 - 第二十三分会: 复杂样品分离分析. 北京: 中国化学会, 2016: 1.
- [20] Zeng, X. and Li, J. (2015) On the Sustainability of Cobalt Utilization in China. *Resources, Conservation and Recycling*, **104**, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.014>
- [21] 王秀, 王振祥, 潘宝, 等. 南淝河表层水中重金属空间分布、污染评价及来源[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 297-303.
- [22] Hudson-Edwards, K.A., Houghton, S.L. and Osborn, A. (2004) Extraction and Analysis of Arsenic in Soils and Sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, **23**, 745-752. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2004.07.010>
- [23] Gray, C.W., McLaren, R.G., Roberts, A.H.C., et al. (1999) The Effect of Long-Term Phosphatic Fertiliser Applications on the Amounts and Forms of Cadmium in Soils under Pasture in New Zealand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **54**, 267-277. <https://doi.org/10.1023/A:1009883010490>
- [24] 彭修强, 项立辉, 郭娜, 等. 南黄海南部海域表层沉积物重金属来源解析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3628-3638.
- [25] Facchinelli, A., Sacchi, E. and Mallen, L. (2001) Multivariate Statistical and GIS-Based Approach to Identify Heavy Metal Sources in Soils. *Environmental Pollution*, **114**, 313-324. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00243-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00243-8)
- [26] Jeong, Y.S., Matsubae-Yokoyama, K., Kubo, H., et al. (2009) Substance Flow Analysis of Phosphorus and Manganese Correlated with South Korean Steel Industry. *Resources, Conservation and Recycling*, **53**, 479-489. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.002>
- [27] 赵庆龄. 基于文献计量的土壤重金属污染国际比较研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [28] 张蔚, 朱江龙. 地下水铁锰污染及治理方法[J]. 广东化工, 2018, 45(18): 163-164+153.
- [29] 张淑丽. 汾河临汾段水质现状及水环境治理研究[J]. 海河水利, 2018(4): 20-21+33.
- [30] 李景海, 杨全明, 谢新民. 安阳市水质现状分析与应对策略[J]. 国土资源科技管理, 2006, 23(1): 49-54.

- [31] 温恒泰. 开发校本课程培养学生的环保意识——泾河平凉段水污染情况的调查研究[J]. 化学教育, 2009, 30(5): 29-30.
- [32] 赵青. 吉林省鸭绿江流域水环境调查研究[C]//中国环境科学学会. 2009年学术年会论文集: 第一卷. 武汉: 中国环境科学学会, 2009: 5.

附录

一、图 1 水样采集城市: 1、宝鸡 2、三明下 3、渭南 4、石嘴山 5、丹东 6、延吉 7、运城 8、临汾 9、吴忠 10、平凉 11、佳木斯 12、营口 13、白山 14、吕梁 15、鹤壁 16、朔州 17、邯郸 18、保定 19、酒泉 20、洛阳 21、安阳 22、烟台 23、焦作 24、潍坊 25、商丘 26、郑州 27、周口 28、许昌 29、淄博 30、济宁 31、舞钢。

二、参与调研城市的金属浓度最大值:

金属	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Mn	Zn
国家标准(mg/L)	0.005	0.5	0.05	1	0.02	0.01	0.1	1
最大值(mg/L)	0.0038	0.17	0.0298	0.824	0.0158	0.0076	0.0748	0.865

注: 由于有部分城市的金属离子未检出, 所以不显示最小值。

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-1557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aac@hanspub.org