



厦门大学学报(自然科学版)
Journal of Xiamen University(Natural Science)
ISSN 0438-0479,CN 35-1070/N

《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目： 自来水、反渗透水及超纯水中颗粒物的单颗粒法评估
作者： 古楚楚, 邓银, 李春园
收稿日期： 2021-12-01
网络首发日期： 2022-06-06
引用格式： 古楚楚, 邓银, 李春园. 自来水、反渗透水及超纯水中颗粒物的单颗粒法评估[J/OL]. 厦门大学学报(自然科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20220602.1858.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

自来水、反渗透水及超纯水中颗粒物的单颗粒法评估

古楚楚, 邓 银, 李春园✉

(厦门大学海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361102)

*通信作者 cyli@xmu.edu.cn

摘要 为评估颗粒物对水质安全和实验室本底可能的影响, 采用 LEO 1530 场发射扫描电镜及 INCA 300 能谱仪对自来水、反渗透水和超纯水中的颗粒物进行了研究。结果表明, 自来水中的颗粒物主要源于地表红壤, 其颗粒占比高达 86.9%。另检出含 Cl-Br 颗粒、含重金属颗粒、燃烧源颗粒和微生物颗粒。其中, 含 Cl-Br 颗粒占比为 6.3%, 它们可能是含氯消毒的副产物, 也可能来源于残留的有机氯农药或杀虫剂。重金属颗粒占比 5.5%, 它们可能主要源于九龙江流域被污染的土壤或矿山开采。燃烧源颗粒主要为燃油源颗粒, 颗粒占比仅为 1.0%。微生物颗粒含量极低, 颗粒占比 0.3%。对比自来水、反渗透水和超纯水颗粒物的含量和组成可知, 纯水机对自来水颗粒物的去除率超过 90%, 但反渗透水和超纯水仍然含有一定量的颗粒物, 其含量在量级上与南中国海海盆表层海水的颗粒物含量大体相当。另外, 需要指出的是, 纯水机在去除颗粒物的同时, 还引入有意义量的含 Cu 颗粒及微生物颗粒。

关键词 自来水; 反渗透水; 超纯水; 颗粒物; 组成与来源; 单颗粒法评估

中图分类号 P 592 文献标志码 A DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202112001

Evaluation of particulate matter in tap water, reverse osmosis water and ultrapure water by single particle analysis

GU Chuchu, DENG Yin, LI Chunyuan✉

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science,

College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen, 361102, China)

Abstract In order to evaluate the possible influence of particulate matter on drinking water quality safety and laboratory water background, the particulate matter samples filtered from tap water, reverse osmosis water and ultrapure water were investigated by LEO 1530 Field Emission Scanning Electron Microscope coupled with an INCA 300 Energy Dispersive X-ray Spectrometry. The results showed that the particles in tap water were mainly red soil particles and their proportion of particles was as high as 86.9%. In addition to red soil particles, the Cl-Br containing particles, heavy metal containing particles, combustion particles and microbial particles were also detected. The proportion of Cl-Br containing particles was 6.3% and they may be by-products of chlorine disinfection, or residual organochlorine pesticides and insecticides. The proportion of heavy metal containing particles was 5.5% and they may be from contaminated soil or mining in the Jiulong River drainage area. The proportion of combustion particles was 1.0% and they may be from fuel combustion. The proportion of microbial particles was 0.3%. Comparing the content and composition of particles in tap water, reverse osmosis water and ultrapure water, it was found that the removal rate of tap water particles by pure water machine exceeds 90%, but reverse osmosis water and ultrapure water still contain a certain amount of particles, and their content was roughly the same as that of the surface seawater of the central South China Sea. In addition, it should be pointed out that while removing particles, the pure water machine also introduces meaningful amounts of Cu containing particles and microbial particles.

Key words tap water; reverse osmosis water; ultrapure water; particulate; compositions and sources; evaluation by single particle analysis

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(40676065, 41276065)

网络首发时间: 2022-06-06 14:38:13 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20220602.1858.004.html>

随着现代工农业的快速发展,人类向环境中排放了大量污染物。其中,重金属、有机氯农药等因其毒性、持久性和生物累积性已经成为世界性的环境问题。九龙江是厦门自来水的主要来源之一,已有的研究表明,九龙江流域地表水、水稻田土壤、蔬菜产地土壤、九龙江口表层沉积物等环境中均存在一定程度的重金属及有机氯农药的污染^[1-11]。虽然九龙江水在自来水厂经历了去除颗粒物、含氯消毒等净化处理,但其净化效果,如自来水中颗粒物的含量、组成、来源以及是否存在重金属、有机氯农药残留、致病微生物等,均缺乏必要的评估。另一方面,已有的研究表明,含氯消毒会产生大量消毒副产物,并会危害人们的健康^[12-14],但迄今对其含量等也缺乏必要的研究。

近几十年来,随着人们生活水平的提高,人们对饮水安全和品质有了更高的要求,各种家用净水器应运而生,各种桶装、瓶装水大量面市。然而,已有的研究表明,尽管微生物危害风险较低,但现有的许多净水方法,在去除颗粒物的同时,会引入微生物^[15-17]。例如,陈玲等^[15]在砂滤水、碳滤水及反渗透水(reverse osmosis, RO水)中均检出了细菌。另外,在实验室内,纯水机制得的RO水和超纯水被普遍视为“纯的”,并广泛应用于实验器皿洗涤、标准溶液配置等。考虑到在RO水中能检出细菌,因此,为厘清实验室用水本底,需要对RO水和超纯水的实际净化效果进行评估。

综上所述,开展自来水、“净化水”净化效果评估,对于饮水安全及实验室用水本底评估等均具有重要的科学意义。由于许多重金属、微生物等自身就是水体颗粒物的主要组成部分之一,颗粒物也是有机氯农药等的主要载体之一。所以对自来水和“净化水”中颗粒物含量、组成与来源的对比研究是评估其净化效果的重要途径之一。

一般而言,经颗粒物去除流程之后,残留在自来水中的颗粒物主要为悬浮颗粒物,由于其含量低(例如,大洋水体悬浮颗粒物的平均浓度为 $10\sim 20\ \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[18])、粒径小(例如,大洋水体悬浮颗粒物的直径以小于 $10\ \mu\text{m}$ 为主^[18]),基本超出了常用方法(例如偏光显微镜法、X射线分析法等)的研究范围。进入20世纪90年代,基于扫描电镜结合能谱的单颗粒法逐渐兴起,由于所需样品量少、放大倍数大且同时可以获得颗粒元素组成及其形貌特征等优势,该方法率先在气溶胶组成与来源的相关研究中得到广泛应用^[19-25]。同时,部分学者也尝试性地对天然水体颗粒物进行了研究^[26-28]。然而,与气溶胶明显不同,在多数情况下,微生物颗粒是天然水体颗粒物的主要组成部分之一,这对研究者的知识结构有了更高的要求。再加上单颗粒法数据处理量大等缺陷,使得天然水体颗粒物组成与来源的单颗粒法研究并未达到预期效果,并且自来水颗粒物组成与来源及其净化效果评估等研究尚未见逐报道。但尽管如此,考虑到样品采集的便利性及所获研究资料的重要价值,单颗粒法仍不失为水体颗粒物含量、组成与来源等的有效研究方法之一。基于上述,本文采用单颗粒法对自来水、RO水和超纯水中的颗粒物进行了研究。

1 材料与方法

1.1 实验材料

定量量取自来水、RO水和超纯水,通过过滤获得其颗粒物样品,冷冻干燥后待用。其中,实验用水取自厦门大学翔安校区周隆泉楼,RO水和超纯水由某公司生产的U-R30和U-R40纯水机制得。所用滤膜为美国EMD Millipore Corporation公司生产的聚碳酸酯滤膜,滤膜直径47 mm,孔径 $0.4\ \mu\text{m}$ 。

实验过程中,为确保单颗粒法定量结果的准确性,在过滤之前,需要通过条件实验确定自来水、RO水和超纯水的取水量。适宜的取水量,一方面要捕获足量的颗粒物,另一方面,还不能使颗粒物在滤膜上堆叠。因为颗粒物的堆叠会严重影响颗粒物的准确计数,从而使定量结果失真。

1.2 扫描电镜与能谱分析

采用扫描电镜(LEO-1530,德国里奥电镜有限公司,放大倍数为 $20\sim 9\times 10^5$,分辨率为 $1.0\ \text{nm}$)及X射线能谱仪(INCA 300,牛津公司,分辨率可达 $133\ \text{eV}$,可以检测 $\text{Be}\sim\text{U}$ 之间所有元素($Z>4$))逐一分析观察到的所有颗粒物样品,工作加速电压为 $20\ \text{kV}$,单个颗粒物的能谱采集时间为

30 ~ 50 s。

由于实验前对样品进行了喷金处理，且 C 和 O 为滤膜的组成元素，为消除上述元素对颗粒物元素组成统计分析的影响，本研究在数据处理过程中将上述元素予以剔除。由于剔除了元素 C 和 O，加上能谱不能检出元素 H，造成本研究检出的有机质和黑碳颗粒，其元素分析结果为“没有任何元素”。特此说明，下不赘述。

1.3 空白滤膜颗粒物本底实验

为定量评估所用滤膜中的颗粒物对实验结果产生的可能影响，本研究进行了空白滤膜实验。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物类型划分与定量表征

2.1.1 空白滤膜颗粒物实验结果

空白滤膜中含有一定量的颗粒物，含量为 21 个/mm²。包括 11 个有机质碎屑颗粒，5 个 Cr 颗粒（Cr 元素原子分数为 100%），2 个铁颗粒（Fe 元素原子分数为 100%），硅酸盐颗粒、铝氧化物颗粒和含氯颗粒各 1 个。基于上述观测结果，本研究在各水样颗粒物的鉴别及定量统计过程中，消除了空白滤膜的可能影响。

2.1.2 颗粒物类型划分

基于颗粒的形貌及元素组成特征，以及九龙江流域地表土壤矿物的相关研究结果^[27-29]，本研究对检出的颗粒物进行了类型划分，其分类依据简述如下。

第一步，微生物颗粒的鉴别。形貌上，它们均具有生物颗粒独有的形貌特征，例如本研究检出的微生物颗粒（图 1 a, b, c, d）。元素组成上，有机质是微生物最主要的物质组成部分，如前所述，本方法给出的元素组成为没有任何元素。除有机质以外，硅藻还具有硅质细胞壁，球石藻具有钙质细胞壁等。

第二步，燃烧源颗粒的鉴别。多数情况下，燃烧源颗粒具有独特的形貌特征。对于生物质燃烧产生的颗粒而言，颗粒表面多见气孔，并且部分颗粒还保留了原植物的形貌特征。对于油燃烧产生的颗粒而言，其典型特征是，大量纳米级球形颗粒聚集形成了葡萄状、串珠状或链球状的集合体。对于煤燃烧产生的颗粒而言，气孔状构造是其重要的鉴定特征之一。除此以外，燃煤还可释放出大量几个微米大小的球形颗粒^[19-25]。在以往的一些研究中，上述颗粒多被称之为黑碳（black carbon），但越来越多的研究表明，上述颗粒物并不一定都是碳质的。为避免不必要的误解，本文称之为“燃烧源颗粒”。

第三步，依次鉴别有机质碎屑、含铜颗粒、含重金属颗粒、含 Cl-Br 颗粒。即没有任何元素的颗粒归类为有机质碎屑颗粒，所有含 Cu 的颗粒归类为含 Cu 颗粒，所有含重金属元素（除 Cu、Fe 以外）的颗粒归类为含重金属颗粒，所有含 Cl、Br 元素的颗粒归类为含 Cl-Br 颗粒。

第四步，依次鉴别石英、铝氧化物、铁氧化物颗粒。即将 Si 元素含量为 100% 的颗粒归类为石英颗粒，将 Al 元素含量为 100% 的颗粒归类为铝氧化物颗粒，将 Fe 元素含量为 100% 的颗粒归类为铁氧化物颗粒。

第五步，依次鉴别高岭石、长石、伊利石。即将 Si、Al 元素含量合计 100% 的颗粒归类为高岭石。将元素 Si、Al 及 K 或 Na 或 Ca 元素含量合计 100% 的颗粒归类为长石。将 Si、Al、Fe、Mg、K 元素含量合计 100% 的颗粒归类为伊利石（部分学者称之为水云母）。

第六步，将剩余颗粒全部归类为过渡矿物颗粒。它们主要为硅铝铁的氧化物，次为铝铁的氧化物。它们是铁镁硅酸盐矿物经伊利石向高岭石或氧化铝转变的过渡矿物。除上述以外，我们把零星检出的矿物，如 MgO、CaO、萤石（CaF₂）等也归为此类颗粒。

需要说明的是，本研究检出部分由多种化学组成构成的复合颗粒，对于这部分复合颗粒物，本研究将优先划分那些可能受人为活动影响且可能对人体健康产生影响颗粒物类型。举例来说，硅酸盐矿

物是地表环境中含量最高、分布最广的颗粒物，当检出的硅酸盐矿物颗粒中含有重金属元素（例如 Hg）时，我们会将这类颗粒物划分为含重金属颗粒，而不是硅酸盐颗粒。

2.1.3 颗粒物含量的定量表征

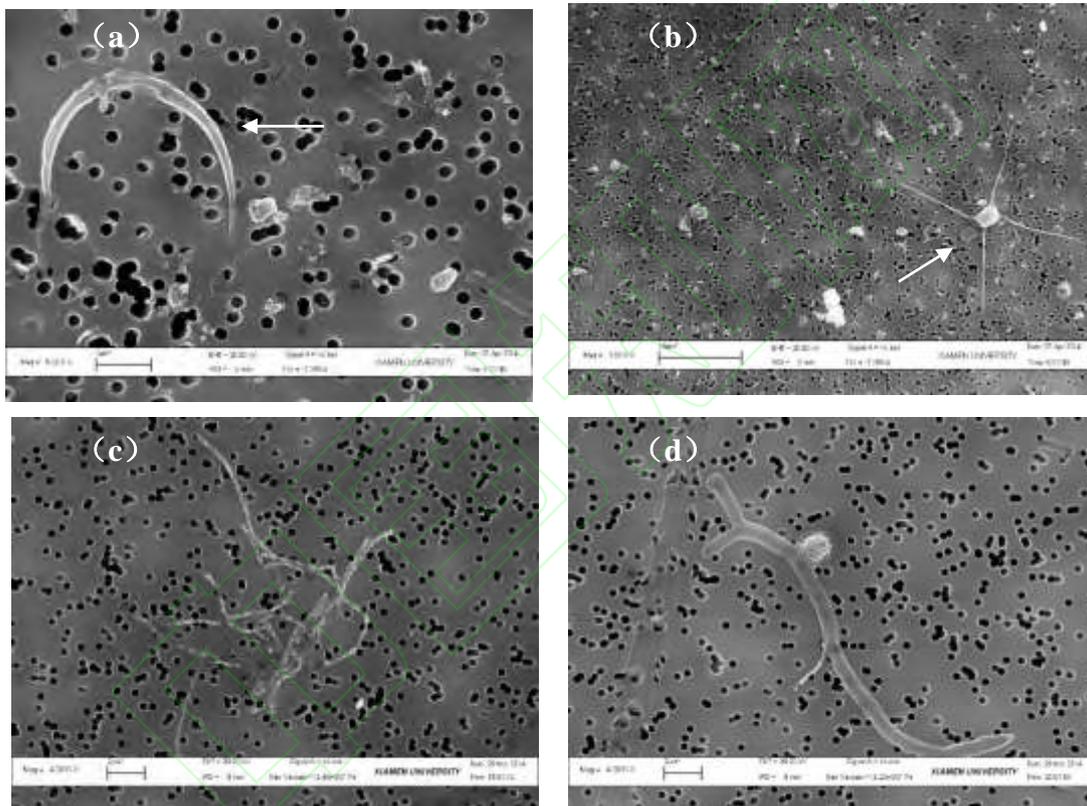
本研究颗粒物含量采用两种方式表征。其一为绝对量的表征，单位为“个/L”，根据式（1）求出。

$$N=(N_v \times A_t)/(A_v \times V) \quad (1)$$

式中 N 为单位体积水中的颗粒个数， N_v 为观测到的颗粒数， A_t 为采样滤膜的总面积， A_v 为电镜观测的滤膜面积， V 为采集水的体积。

其二为相对量的表征，单位为“%”。即各类型颗粒物在总颗粒数中的百分数。

需要说明的是，本研究给出的定量结果基于颗粒个数的统计分析。对于低检出率（例如，1%及以下）的颗粒物而言，其检出具有偶然性，基于此，本文后续讨论中，将忽略<1%的量变。



(a)、(b)为自来水中微生物颗粒（箭头所指）的电镜图，仅此两例。(a)中的线段比例尺为 $2\mu\text{m}$ ，(b)中的线段比例尺为 $10\mu\text{m}$ 。(c)为RO水中微生物颗粒的电镜图，该类微生物颗粒占RO水微生物颗粒的98.4%~100.0%。(d)为RO水中微生物颗粒的电镜图，该类微生物颗粒占RO水微生物颗粒的0~1.6%。(c)和(d)中的线段比例尺均为 $2\mu\text{m}$ 。

图1 自来水、RO水中微生物颗粒扫描电镜图

Fig. 1. SEM images of microbial particles from tap water, reverse osmosis water and ultrapure water.

表1 自来水、RO水和超纯水中各类型颗粒物含量表
Tab. 1 Content of various types of particles from tap water, RO water and ultrapure water

样品	有机质碎屑/%	石英/%	铝氧化物/%	铁氧化物/%	高岭石/%	长石/%	伊利石/%	过渡矿物/%	微生物/%	燃烧源颗粒/%	含铜颗粒/%	含重金属颗粒/%	含 Cl-Br 颗粒/%	总颗粒数/ $10^4 L^{-1}$	统计样本数/个
自来水	2.7	1.9	12.3	8.7	32.3	2.8	2.2	24.0	0.3	1.0	0.0	5.5	6.3	4984.3	668
RO-40	24.6	3.9	1.2	0.6	4.3	6.1	3.2	6.3	24.3	1.0	17.8	3.9	2.8	14.0	507
超纯-40	22.9	5.8	0.6	0.4	13.4	19.6	6.4	17.5	0.0	1.2	0.0	4.0	8.2	9.3	673
RO-30	18.4	7.2	0.3	0.7	5.6	9.2	4.9	8.5	22.5	0.0	8.9	5.6	8.2	267.4	305
超纯-30	37.6	9.6	0.8	1.2	11.2	10.8	5.2	5.6	0.0	1.2	12.8	1.2	2.8	18.4	250

2.2 自来水颗粒物组成与来源

如前所述,本研究将颗粒物划分为 13 种类型,各类型颗粒物含量列于表 1。由表 1 可以看出,自来水最主要的颗粒物是高岭石和过渡矿物,其颗粒数占比分别为 32.3%和 24.0%。其次为氧化铝和氧化铁,其颗粒数占比分别为 12.3%和 8.7%。含 Cl-Br 和重金属颗粒的颗粒数占比分别为 6.3%和 5.5%。石英、长石、伊利石及有机质碎屑的颗粒数占比介于 1.9% ~ 2.8%之间。另检出 1.0%的燃烧源颗粒和 0.3%的微生物颗粒。未检出含 Cu 颗粒。下面本文将从自然源及人为源两个层面分述各类型颗粒物的来源。

2.2.1 自然源颗粒物组成与来源

一般而言,自来水中的颗粒物主要源于其水源径流流域的地表土壤或沉积物。厦门的自来水主要来自九龙江。九龙江流域地处亚热带季风气候区,气温高、降水充沛,光能充足,水热作用强烈,土壤原生矿物的风化及淋溶作用均较强烈,使得流域内广泛发育红壤。研究表明,九龙江流域红壤的风化作用已进入高岭石阶段。以福建漳浦赤红壤为例,其 $< 2\mu m$ 的粘粒中,主要矿物颗粒为高岭石(32%)、非晶质物质(即过渡矿物,26%)和氧化铁(19%),含少量水云母(即伊利石),约 3%左右,可见长石、石英,约 2%,未见有晶质的三水铝石存在^[29-31]。将该研究结果与本研究自来水的观测结果对比可知,自来水中检出的高岭石、过渡矿物、氧化铝、氧化铁、石英、长石、伊利石及有机质碎屑均主要源于九龙江流域广泛发育的红壤。

除地表土壤或沉积物源的颗粒以外,自然背景下,微生物也是天然水体最主要的颗粒物组成部分之一^[32-33]。在过去几年间,笔者采用单颗粒法对南中国海水体颗粒物的组成与来源进行了研究。结果表明,各类浮游植物及其碎片占总颗粒数的 10.8% ~ 89.7%,平均值为 48.9% (另文发表)。但本研究微生物颗粒(图 1(a)和(b))在自来水中的占比仅为 0.3%,显著低于天然水体微生物颗粒的占比,这可能与自来水的相关消毒措施有关。依据我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),原水在进入自来水管网之前,须经消毒处理。由于消毒的目的本质上就是杀灭水体中的微生物,由此不难看出,消毒就是导致自来水中微生物颗粒占比显著低于天然水体的主要原因。

2.2.2 人为源颗粒物组成与来源

本研究在自来水中检出 5.5%的含重金属颗粒,其中 3.3%含 Hg, 1.6%含 Mn, 其余为含 Zn、Ti、Cr 颗粒,三者合计 0.6%,均属偶有检出。检出的含 Mn 颗粒中,基本同时检出铁元素。由于九龙江流域内存在矽卡岩风化壳型铁锰矿床(龙岩市竹子板)的开采活动^[1-2],因此,自来水中的含 Mn 颗粒可能与此有关。检出的含 Hg 颗粒,主要与红壤颗粒共生,由于九龙江流域土壤、水体普遍可检出 Hg 或存在 Hg 污染^[3-6],因此,自来水中的含 Hg 颗粒可能与此有关。

本研究检出 6.3%的含 Cl-Br 颗粒。其中,3.8%为含 Cl 颗粒,2.5%为含 Br 颗粒。在含 Cl 和含 Br 颗粒中,约一半与红壤颗粒共生。另一半为纯的 Cl、Br 颗粒,即 Cl、Br 的原子百分数为 100%。由于常温常压下,单质 Cl 是气体,单质 Br 是易挥发性液体。因此,检出的这部分 Cl、Br 颗粒不太可能是单质 Cl、Br。由于本研究在数据处理过程中去除了元素 C、O,因此,这部分 Cl、Br 颗粒可能的存在形式为有机 Cl、Br 颗粒。其可能的来源有以下两个。其一为可能与水处理有关。如前所述,

依据我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),原水在进入自来水管网之前,须经消毒处理。目前氯消毒是最普遍的一种消毒方式,例如,厦门水务集团的水质公告将游离余氯作为衡量水质的重要参数之一(www.xiamenwater.com)。然而大量的研究表明,氯消毒会生成大量消毒副产物,例如,卤乙酸、卤乙腈等^[12-14]。因此,氯消毒副产物可能是自来水含 Cl-Br 颗粒的重要来源之一。其二为可能与农药和杀虫剂的大量使用有关。自 20 世纪中叶以来,随着现代农业的快速发展,有机氯、溴氰菊酯、溴氰虫酰胺等农药和杀虫剂广泛使用。迄今仍可以在土壤、水体和沉积物等环境中检出有机氯农药^[7-11]。由于约一半含 Cl-Br 颗粒与红壤颗粒共生,且红壤颗粒是自来水最主要的颗粒物来源。因此,检出的含 Cl-Br 颗粒也可能来源于农药和杀虫剂的大量使用。

本研究在自来水中检出的燃烧源颗粒主要为燃油源颗粒,可能与汽车尾气排放有关。但从其含量(仅为 1.0%)来看,属偶有检出之列,表明其对自来水的的影响相对有限。

2.3 自来水、RO 水和超纯水颗粒物含量与组成的对比分析

自来水、RO 水和超纯水各类型颗粒物含量列于表 1。由表 1 可以看出,自来水、RO 水和超纯水颗粒物含量与组成存在着显著差别,这些差别表明纯水机的净水过程不仅有颗粒物的去除,同时还存在着颗粒物的引入。这为评估“纯净水”可能的健康风险及实验室“纯净水”本底等提供了诸多重要的科学信息。

2.3.1 纯水机颗粒物去除效率

由表 1 可知,从颗粒物总量上来看,自来水颗粒物含量为 4984.3×10^4 个/L,远远高于 RO 水和超纯水。如果单纯从表 1 给出的数据来看,U-R40 纯水机制得的 RO 水和超纯水,其颗粒物去除率分别为 99.7% 和 99.8%。U-R30 纯水机制得的 RO 水和超纯水,其颗粒物去除率分别为 94.6% 和 99.6%。但需要指出的是,RO 水和超纯水仍然含有一定量的颗粒物。其中,U-R40 纯水机制得的 RO 水和超纯水,其颗粒物含量分别为 14.0×10^4 个/L 和 9.3×10^4 个/L。U-R30 纯水机制得的 RO 水和超纯水,其颗粒物含量分别为 267.4×10^4 个/L 和 18.4×10^4 个/L。为了给上述 RO 水和超纯水颗粒物含量一个直观的印象,将其与南中国海海盆连续观测站(SEATS 站)表层海水颗粒物含量的实际观测结果进行对比。我们在 SEATS 站表层海水,采用单颗粒法,9 月初观测到的含量为 6.6×10^4 个/L,5 月初观测到的含量为 195.0×10^4 个/L(另文发表)。由此可见,RO 水和超纯水颗粒物含量在量级上与南中国海海盆表层海水的颗粒物含量大体相当。

2.3.2 纯水机净水过程中颗粒物的引入

对比自来水、RO 水和超纯水颗粒物的组成(表 1)可以发现,在自来水中,未检出含 Cu 颗粒,但 U-R40 纯水机制得的 RO 水,其含 Cu 颗粒占比高达 17.8%。U-R30 纯水机制得的 RO 水和超纯水,其含 Cu 颗粒占比分别为 8.9% 和 12.8%。这可能与纯水机内部或外部使用的 Cu 质部件有关。Cu 广泛应用于自来水管道的各种阀门、接头等部件,Cu 质部件的锈蚀也是生活中常见的现象。对于自来水而言,由于使用频繁,水更新快,使得自来水中 Cu 质部件锈蚀产生的含 Cu 颗粒不易富集,从而难以检出。与自来水明显不同,一方面,纯水的使用率显著低于自来水,另一方面,纯水机内部有诸多用于截留颗粒物的过滤装置。当截留的颗粒物超过纯水机的最大截留容量后,包括 Cu 在内的颗粒物就会随着 RO 水或超纯水而流出,这可能是 RO 水和/或超纯水检出含 Cu 颗粒的原因。

除含 Cu 颗粒以外,两台纯水机制得的 RO 水中均检出有意义量的微生物颗粒。U-R40 纯水机和 U-R30 纯水机制得的 RO 水,其微生物含量分别为 24.3% 和 22.5%。并且,RO 水中检出的微生物种类与自来水完全不同(图 1)。表明 RO 水中检出的微生物是制水过程中产生的。事实上,以往的相关研究也发现了这种现象^[15-17]。这意味着纯水机制水过程引入微生物颗粒是普遍的现象。这可能是由于:与正常自来水相比,纯水的使用频率相对较低,导致水在纯水机内的滞留时间加长,而自来水中的余氯会随着时间的推移而快速衰减,导致微生物的繁殖^[15-17]。此外,纯水机对水中颗粒物的捕集,一定程度上相当于在纯水机内部再造了土壤生态系统,也有利于微生物的繁殖。

3 结 论

自来水中的颗粒物主要为红壤颗粒,另检出含 Cl-Br 颗粒、重金属颗粒、燃烧源颗粒和微生物颗粒。其中,红壤颗粒主要包括高岭石、过渡矿物、氧化铝、氧化铁、长石、伊利石、石英及有机质碎屑,其颗粒数占比分别为 32.3%、24.0%、12.3%、8.7%、2.8%、2.2%、1.9%和 2.7%,合计 86.9%。含 Cl-Br 颗粒含量为 6.3%,它们可能是含氯消毒的副产物,也可能来源于残留的有机氯农药或杀虫剂。重金属颗粒主要为含 Hg 颗粒和含 Mn 颗粒,其含量分别为 3.3%和 1.6%,除此之外,还零星检出含 Zn、Ti、Cr 颗粒,三者合计 0.6%。它们可能主要源于九龙江流域被污染的土壤或矿山开采。燃烧源颗粒主要为燃油源颗粒,颗粒数占比仅为 1.0%。微生物颗粒含量极低,颗粒数占比仅 0.3%。纯水机对自来水颗粒物的去除率超过 90%,但 RO 水和超纯水仍然含有一定量的颗粒物,其含量在量级上与南中国海海盆表层海水的颗粒物含量大体相当。需要指出的是,纯水机对自来水的净化,在去除颗粒物的同时,还引入有意义量的含 Cu 颗粒及微生物颗粒。

致谢:感谢厦门大学纳米科技研究中心翟和生和薛茹老师在实验过程中的大力支持与帮助。

参考文献:

- [1] 陈能汪,王德利,鲁婷,等.九龙江流域地表水锰的污染来源和迁移转化机制[J].环境科学学报,2018,38(8):2955-2964.
- [2] 曾雨.九龙江北溪饮用水源地铁、锰浓度调查分析[J].化学工程与装备,2015,(6):272-273.
- [3] 王燕云,林承奇,黄华斌,等.福建九龙江流域水稻土重金属污染评价及生态风险[J].环境化学,2018,37(12):2800-2808.
- [4] 洪曾纯,郭永玲,王果.福建省蔬菜产地土壤汞污染状况及其影响因素[J].农业资源与环境学报,2015,32(2):198-203.
- [5] 李青生,王翠,蒋金龙,等.九龙江口表层沉积物重金属的污染特征与来源分析[J].海洋科学,2020,44(12):32-43.
- [6] 马晓霞,姜兆玉,王永飞,等.福建漳江口红树林沉积物重金属汞(Hg)的分布特征[J].生态科学,2019,38(2):9-17.
- [7] KESWANI C,DILNASHIN H,BIRLA H,et al. Global footprints of organochlorine pesticides:a pan-global survey[J].Environ Geochem Health,2021,doi:org/10.1007/s10653-021-00946-7.
- [8] 瞿程凯,祁士华,张莉,等.福建戴云山土壤有机氯农药残留及空间分布特征[J].环境科学,2013,34(11):4427-4433.
- [9] 劳齐斌,卜德志,张可欣,等.福建沿海海岛大气颗粒物中有机氯农药的区域背景及污染特征[J].环境科学研究,2018,31(10):1719-1727.
- [10] 梁玉兰.九龙江流域农田土壤有机氯农药残留污染特征[J].水生态学杂志,2019,40(1):71-78.
- [11] 陈伟琪,张路平,徐立,等.厦门-金门海域表层沉积物中HCHs、DDTs和PCBs的含量与分布[J].厦门大学学报(自然科学版),1996,35(6):936-940.
- [12] 朱红霞,薛荔栋,刘进斌,等.含氯消毒副产物的种类、危害与地表水污染现状[J].环境科学研究,2020,33(7):1640-1647.
- [13] 王启淳,雷宁生,曾炫萍.离子色谱法测定饮用水中亚氯酸盐、氯酸盐和溴酸盐的残留量[J].化学工程师,2021(5):26-28.
- [14] 任峰.水处理工艺对消毒副产物生成及其前体物控制[J].净水技术,2020,39(12):87-93.
- [15] 陈玲,杨小鹏,陆永成,等.包装饮用水生产工艺中微生物风险分析[J].现代食品科技,2018,34(9):277-282.
- [16] 张明露,刘文君,李翠萍,等.活性炭净水工艺微生物安全性研究[J].给水排水,2015,41(8):22-26.
- [17] 魏磊,吴清平,张菊梅,等.矿泉水和山泉水中铜绿假单胞菌污染调查及分离菌株毒力基因与耐药性分析[J].微生物学通报,2015,42(1):125-132.
- [18] 郭锦宝.化学海洋学[M].厦门:厦门大学出版社,1997:210-223.
- [19] STOFFYN-EGLI P,POTTER T M,LEONARD J D,et al. The identification of black carbon particles with the analytical scanning electron microscope: methods and initial results[J]. Science of The Total Environment, 1997,198(3):211-223.
- [20] SACHDEVA K,ATTRI A K. Morphological characterization of carbonaceous aggregates in soot and free fall aerosol samples[J]. Atmospheric Environment,2008,42: 1025-1034.
- [21] BRODOWSKI S,AMELUNG W,HAUMAIER L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy[J]. Geoderma, 2005,128: 116-129.
- [22] 李泽熙,邵龙义,侯聪,等.北京西北城区春季PM10单颗粒形貌类型及成分特征[J].中国环境监测,2013,29(4):28-33.
- [23] 雷晓宁,修光利,王鹏伟,等.地铁环境中黑碳和PM2.5的个体暴露特征[J].环境化学,2016,35(5):843-849.
- [24] 冯小姣,耿红,彭妍,等.太原市灰霾期间黑碳气溶胶形貌与成分分析[J].地球化学,2021,50(1):75-87.
- [25] SHAO L Y, LI J, ZHANG M Y, et al. Morphology, composition and mixing state of individual airborne particles: Effects of the 2017 Action Plan in Beijing, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 329: 129748. https://doi.org/10.1016/j.jclepro. 2021.129748
- [26] XHOFFER C, WOUTERS L, VAN GRIEKEN R. Characterization of individual particles in the North Sea surface microlayer and underlying seawater: comparison with atmospheric particles[J]. Environ Sci Technol, 1992, 26: 2151-2162.
- [27] JAMBERS W, DEKOV V, VAN GRIEKEN R. Single particle characterisation of inorganic and organic North Sea suspension[J]. Marine Chemistry, 1999, 67: 17-32.
- [28] IWAMOTO Y, NARITA Y, TSUDA A, et al. Single particle analysis of oceanic suspended matter during the SEEDS II iron fertilization experiment[J]. Marine Chemistry, 2009, 113: 212-218.
- [29] 樊明辉,孙传敏,何政伟,等.中国南方红壤演化的矿物学特征[J].成都理工学院学报,1999,26(3):313-316.
- [30] 马毅杰,罗家贤,蒋梅茵,等.我国南方铁铝土矿物组成及其风化和演变[J].沉积学报,1999,17(增):681-686.
- [31] 魏为兴.福建沿海地区表层土壤矿物分布特征及地质和环境意义[J].岩矿测试,2009,28(1):125-130
- [32] 杨洪允,周雯,乔永民,等.洱海浮游植物群落结构及其与环境因子分析[J].环境科学与技术,2021,44(7):123-132.

[33] 张雪, 王俊, 高燕, 等. 2014年春季渤海浮游植物群落结构[J]. 海洋科学, 2020, 44(6): 45-55.

