



· 科技信息综述 ·

饮用水中微塑料的检测、存在水平与来源

田 妤 李 悦 李伟英

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 基于近年来国内外饮用水中微塑料的研究成果, 归纳了微塑料的检测方法, 探讨了饮用水中微塑料的存在状况及存在水平。通过来源解析, 提出饮用水中微塑料主要由水源污染、净水处理流程和矿泉水包装、空气污染等所致。

关键词 微塑料 饮用水 检测方法 来源

中图分类号: TU991

文献标识码: A

文章编号: 1002-8471(2020)08-0152-07

DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2020.08.030

Detection, concentration and source of microplastics in drinking water

Tian Yu, Li Yue, Li Weiyang

(College of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on recent researches relevant to microplastics in drinking water around the world, this article mainly concluded detection methods for microplastics, and summarized the concentrations of microplastics in drinking water. By analyzing the potential source, we recommend that water resource, treatment process and packaging, air contamination may be the main pollution.

Keywords: Microplastics; Drinking water; Detection methods; Source

0 引言

塑料制品因稳定性好、可塑性强、成本低廉以及轻便耐用等优点而得以被广泛应用, 经过 20 世纪 50 年代后的飞速发展, 如今, 塑料制品已是随处可见。在 1950—2015 年间, 全球生产共 83 亿 t 塑料, 其中近 60% 被丢弃至周围环境^[1]。2019 年欧洲塑料制造商协会 (Plastics Europe)^[2] 公布的报告显示, 世界塑料年产量在 2018 年已高达 3.59 亿 t, 中国作为世界最大的塑料生产国, 国内塑料年产量占全球总量的 30%。据调查, 即使在偏僻的岛屿或深海中, 亦可发现塑料的踪影^[3]。

2004 年, Thompson 等^[4] 证实环境中存在小尺

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979194); 中国工程科技发展重庆研究院 2019 年院士战略咨询研究项目 (2019-CQ-ZD-1)。

寸塑料污染并首次提出“微塑料”一词。微塑料可被分为初级微塑料和次级微塑料, 前者根据实际需要被直接加工成微小塑料颗粒制品, 可用于化妆品行业或作为工业原料, 后者则是由大型塑料经过物理磨损、光降解以及生物作用等破碎而成的。一般认为, 微塑料是指粒径小于 5 mm 的塑料纤维、碎片或颗粒, 具有分布范围广、粒径小、难生物降解等特点。研究者们认为微塑料的潜在危害主要体现在 3 个方面: ①微塑料本身: 被人或动物摄取后可能影响其正常的生理功能^[5]; ②塑料制造过程中引入的添加剂和进入环境后可能吸附的有机污染物: 能够通过食物链在生物体内富集^[6]; ③微塑料表面的生物膜: 增加微塑料携带致病菌以及抗性基因的可能性^[7]。

人们最早开始关注海洋环境中的微塑料, 此后, 针对淡水领域的研究不断涌现。由于饮用水中微塑



料的浓度普遍偏低,因此相关研究起步较晚。然而,饮用水作为日常所需,与人体健康有着更为紧密的联系,明确饮用水中微塑料的检测方法、存在水平及潜在来源具有重要意义。

1 饮用水中微塑料的检测

当前,有限的资料无法准确反映饮用水中微塑料的研究现状以及可能引发的危害,而不恰当的检测方法则使得数据的可信度大大降低。Koelmans 等^[8]对近年来涉及饮用水检测的 50 篇相关研究进行了分析与标准化评价,其中仅有 4 篇能较好地满足建议操作标准。饮用水中微塑料的检测主要包括样品采集和贮存、实验室准备及条件控制、样品预处理(如过滤等)和分析识别等步骤。

1.1 样品采集与预处理

取样过程中,应当记录日期、地点和使用材料等基本信息。在收集龙头水时,提前放水 1 min 或更久,避免伴随的空气污染;并且需要记录水流流速以及水源类型等用于后续的数据解释。针对饮用水中微塑料浓度较低的情况,Koelmans 等^[8]建议过滤 1 000 mL 的龙头水,同时建议过滤 10 L 瓶装水,如此可减少因过滤体积偏小而导致的未检出或检测误差较大的情况。在对矿泉水样品进行检测时,应当完善来源、生产批次等信息;过滤前摇动瓶身使得样品混合均匀,同时多次冲洗瓶内壁以最大限度地获取微塑料。

针对样品处理及检测方法目前并没有统一的标准。检测过程中,滤膜孔径、取样方法以及过滤体积的不一致在一定程度上降低了类似研究间的可比性。

1.2 微塑料的分析与鉴定

微塑料的分析主要包括对疑似塑料物质的物理特性分析和化学特性分析^[15]。在实际检测中,一般常用解剖显微镜对微塑料进行大致的定量分析,而后通过显微红外、显微拉曼以及 SEM-EDS 等方法进行化学成分的分析鉴定。

1.2.1 解剖显微镜

通过显微镜放大物体表面的纹理和结构,对照已知聚合物的密度、颜色、形状等特点来鉴定微塑料。该法能够检测的微塑料粒径在几百 μm 以上,但不适用鉴定粒径小于 100 μm 且无颜色、无特定形状样品^[16]。与直接目视法的特点类似,虽然方

表 1 预处理操作

Tab.1 Operation of pretreatment

样品类型	过滤体积/L	孔径/ μm	其他操作	参考文献
瓶装矿泉水	0.25	0.4	加入 EDTA 去除 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 干扰,SDS 溶液增加均一性,采用涂铝聚碳酸酯膜	Oßmann et al. 2018 ^[9]
	0.7~1.5	3.0	与 Oßmann 等人相比,未进行前处理,采用镀金聚碳酸酯膜	Schymanski et al. 2017 ^[10]
	0.5~0.6 0.75~2	1.5	通过尼罗红进行染色	Mason et al. 2018 ^[11]
龙头水	0.457~0.603	2.5	经过 2 次过滤,并通过玫瑰红进行染色	Kosuth et al. 2018 ^[12]
	50	11~12	加入乙酸(32%)去除无机物	Strand et al. 2018 ^[13]
	1 200~2 500	3	使用稀盐酸去除无机物	Mintenig et al. 2018 ^[14]

便经济但准确率较低,易导致分类错误。使用该方法时,尺寸小于 1 mm 的微塑料容易被漏数或者错误计数,因此需要采用显微红外或显微拉曼等其他分析方法作进一步鉴定。显微镜对类塑料颗粒的误判率通常超过 20%^[17-18],检测过程中需要采用标准化方法以降低误判的可能。为了提高鉴定结果的准确性,采用尼罗红等染料对疏水性微塑料颗粒进行染色不失为一种有效的办法,染色法能够有助于识别微米级的 PE、PP、PS 等材料,将荧光显微镜与 FTIR 分析相结合,在有效避免颗粒漏数的同时还能节省检测时间^[19]。

1.2.2 显微红外

红外光谱可以提供粒子特定化学键的信息,通过将样品粒子的红外光谱与光谱库中某聚合物的标准光谱进行匹配,在识别出微塑料的同时能进一步确定聚合物的类型^[20-21]。该法可检测的微塑料粒径大于 20 μm ^[22]。与热分析方法相比,使用显微红外不破坏样品^[23]。检测时,无需繁杂的样品准备过程,鉴定准确率高。但该方法检测时间长,即使采用配备焦平面阵列(FPA)的反射模式,完整扫描一张滤纸也需要近 9 h^[24]。此外,显微红外鉴定混合物



的能力弱,聚集在一起的多个塑料颗粒可能会被识别为一个颗粒。

1.2.3 显微拉曼

根据“拉曼偏移”原理,可获得检测样品的拉曼光谱,通过与光谱库进行比对能识别微塑料,鉴定粒子组成^[25-26]。该法的最小检测粒径可达 $1\ \mu\text{m}$ ^[27-28]。显微拉曼光谱可对最多 5 000 个粒子进行计数,根据实际情况在选择随机粒子的模式下利用外推也能获得颗粒总数^[10]。该方法提供非接触、非破坏的分析过程,同时无需对样品进行特殊处理。然而,在激光照射时样品可能产生的荧光效应会对识别过程造成干扰,此外,显微拉曼对添加剂和颜料等物质较为敏感,因此会影响对塑料类型的判断^[29]。

1.2.4 SEM-EDS

在扫描电镜(SEM)的基础上增加能量散射 X 射线从而得到 X 射线光电子能谱,不仅能获得高分辨率的表面图像,还可以通过分析能谱进一步得知物体的元素组成信息^[30-31]。该方法能在低真空的环境下使用,无需对样品进行镀膜处理,同时避免了电荷影响^[32]。与单独使用 SEM 相比,SEM-EDS 能通过化学分析提高检测结果的准确性。但是该方法需要繁杂的样品准备过程,检测时间较长,且仪器价格较为昂贵,因此限制了样品的数量。此外,SEM 不能通过颗粒颜色进行识别,可能导致微塑料丰度不准确^[33]。

2 饮用水中微塑料的存在水平

2.1 龙头水中微塑料的存在水平

2017 年,Orb Media^[34]首次对龙头水中微塑料进行了报道,调查显示,在从十多个国家收集的龙头水样品中,有 83% 的样品被塑料纤维污染。同年,Kosuth 等^[12]发现人体平均每年从自来水、啤酒和海盐中摄入超过 5 800 个塑料颗粒,其中自来水提供了 88% 的摄入量。现有资料表明,自来水中的微塑料污染已是十分普遍的问题。

由于目前对龙头水中微塑料的检测相对有限,且各研究之间颗粒的尺寸范围及检测方法不同,因此难以对龙头水中微塑料的存在水平形成较为准确的认识。Mintenig 等^[14]发现以地下水作为水源时,整个水处理流程中微塑料的浓度较低,检出率仅为

表 2 自来水中微塑料的存在水平

Tab.2 Concentrations of microplastic in tap water

浓度/p/L	尺寸范围	主要成分	样品数	参考文献
4.3	0.1~5 mm	—	159	Kosuth et al. 2018 ^[12]
7.0×10^{-4}	>20 μm	PE,PA	24	Mintenig et al. 2018 ^[14]
0.312	>100 μm	PET,PP,PS	17	Strand et al. 2018 ^[13]
338~628	>1 μm	PET,PP,PE	9	Pivokonsky et al. 2018 ^[35]
<4.1	>60 μm	—	24	Uhl et al. 2018 ^[36]

10/24(总样品量为 24 份,14 份未检出)。而 Pivokonsky 等^[35]的研究则表明,当检测限为 $1\ \mu\text{m}$ 时,水厂出水中小于 $10\ \mu\text{m}$ 的微塑料占 95%,是以微塑料浓度高达 338~628 p/L。由此可见,饮用水中粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的微塑料或为绝大多数,而颗粒的检测限是造成其浓度差异的重要因素。

2.2 瓶装矿泉水中微塑料的存在水平

Wiesheu 等^[37]于 2016 年在证实显微拉曼可用于饮料中塑料纤维的检测时发现瓶装矿泉水中存在微塑料,然而当时检测的样品数只有 1 个,且由于无法判断合成纤维来自空气污染还是矿泉水本身而缺少说服力。此后 Schymanski 和 Obmann 等^[9-10]先后对矿泉水中的微塑料进行了较为可靠的检测,尽管都通过显微拉曼进行分析鉴定,但由于尺寸范围的差异导致二者的检测结果差异较大。研究表明,不同瓶体的包装能够显著影响矿泉水中微塑料的存在水平,一般而言,可回收塑料瓶中的微塑料浓度总是高于一次性塑料瓶,而采用玻璃瓶包装的矿泉水中微塑料的浓度也相对较高。Zuccarello 等^[38-39]还采用一种新型的专利方法对瓶装矿泉水中尺寸在 $0.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的微塑料进行了定量分析,结果发现其浓度高达 $5.42 \times 10^7 \pm 1.95 \times 10^7$ p/L。根据现有研究,尺寸大于 $5\ \mu\text{m}$ 的微塑料在矿泉水中的浓度一般为每升几十个至几百个。事实上,为了更加准确地反映矿泉水中微塑料的存在水平,尚需要更多的相关试验进行佐证。

3 饮用水中微塑料的来源解析

明确微塑料颗粒的来源有助于实现对饮用水中微塑料污染的控制。结合饮用水处理流程,对从地表水源至龙头水的过程中可能存在的污染源进行了



表 3 瓶装矿泉水中微塑料的存在水平

Tab.3 Concentrations of microplastics in bottle water

包装类型	浓度/p/L	尺寸范围/ μm	主要成分	样品数	参考文献
可回收塑料瓶	118 ± 88	5~20 (80%)	PET、PP	22	Schymanski et al. 2017 ^[10]
一次性塑料瓶	14 ± 14				
饮料纸盒	11 ± 8				
玻璃瓶	50 ± 52	>1	PET	9	
一次性 PET 塑料瓶	2 649 ± 2 857			10	
可回收 PET 塑料瓶	4 889 ± 5 432		12		
玻璃瓶	6 292 ± 10 521	PET、PE	10	Obmann et al. 2018 ^[9]	
瓶装水	325	>6.5	PP	259	Mason et al. 2018 ^[11]
PET 塑料瓶	5.42 × 10 ⁷ ± 1.95 × 10 ⁷	0.5~10	—	30	Zuccarello et al. 2019 ^[38-39]

分析。瓶装矿泉水一般以城市自来水或者水质较好的地表天然水作为水源,经处理包装后供直接饮用。因此,在一定程度上自来水和矿泉水的污染源类似,主要体现在以下 4 个方面。

(1) 水源本身携带。越来越多的研究证明地表水中存在微塑料污染问题(见表 4)。由于所受人活动影响的不同,各地表水体间的污染程度各异。结合现有研究,目前国内淡水环境中的微塑料浓度普遍在每立方米几千个左右。在 WHO 发布的一份报告中显示,淡水中微塑料的来源主要包括:陆源污染、污水处理厂出水以及处理不当的塑料垃圾^[40]。当饮用水处理厂以地表水作为水源时,尽管通过传统的混凝、澄清和过滤等工艺能够去除水中 70%~82% 的微塑料^[35],然而未能完全处理的塑料颗粒却最终得以进入龙头水中。瓶装矿泉水主要以自来水或天然水体作为水源,因此也会受到微塑料污染。

(2) 净水处理流程和矿泉水包装。针对龙头水, Mintenig 等^[14]通过检测发现,在原水以及处理后的水中微塑料的平均浓度都很低,两者之间并没有明显差别,然而,相关处理构筑物却被证实对微塑料具有较好的去除效果。造成实际情况与理论预测不符的原因可能是处理及输送过程中使用的塑料设备向

表 4 地表水中微塑料浓度

Tab.4 Concentrations of microplastics in surface water

水体名称	尺寸	浓度	文献来源
洞庭湖	>330 μm	900~2 800 p/m ³	wang et al. 2018 ^[41]
洪湖		1 250~4 650 p/m ³	
三峡水库	0.048~5.0 mm	1 597~12 611 p/m ³	Di and Wang. 2018 ^[42]
三峡水库	>112 μm	3407.7 × 10 ³ ~13 617.5 × 10 ³ p/km ²	Zhang et al. 2015 ^[43]
武汉水系	0.05~5.0 mm	1 660~8 925 p/m ³	Wang et al. 2017 ^[44]
长江口	0.5~5.0 mm	4 137.3 ± 2 461.5 p/m ³	Zhao et al. 2014 ^[45]
太湖	>333 μm	3.4~25.8 p/L	Su et al. 2016 ^[46]
青海湖	0.112~5 mm	0.05 × 10 ⁵ ~7.58 × 10 ⁵ p/km ²	xiong et al. 2018 ^[47]
苏必利尔西湖	>333 μm	37 000 p/km ²	Hendrickson et al. 2018 ^[48]
莱茵河	>300 μm	892 777 p/km ²	Mani et al. 2015 ^[49]
大湖支流	>333 μm	0.05~32 p/m ³	Baldwin et al. 2016 ^[50]
塞纳河	5~100 μm	66.2 p/m ³	Dris et al. 2018 ^[51]
渥太华河	>100 μm	近岸: 0.05~0.24 p/L 河中部: 1.35 p/m ³	Vermaire et al. 2017 ^[52]
意大利高山湖泊(3个湖泊)	—	40 000 p/km ² 39 000 p/km ² 25 000 p/km ²	Sighicelli et al. 2018 ^[53]
密歇根湖	—	17 000 p/km ²	Mason et al. 2016 ^[54]

水中释放了微塑料。

针对矿泉水, Obmann 等^[9]在检测瓶装矿泉水中的微塑料时发现,采用 PET 包装的矿泉水中 PET 颗粒是最主要的污染物,此外,旧瓶中的微塑料含量比新瓶中的含量更高,这表明矿泉水的包装或为水中微塑料的主要来源。在对旧瓶的清洗过程中,由于瓶身的磨损会导致更多塑料颗粒的产生,因此生产过程中冲洗液的污染可能是一个十分重要的原因。值得一提的是,研究证实重复扭动瓶盖的操作也会增加瓶盖与瓶颈处的机械磨损,进而导致微塑料颗粒的释放^[55]。

(3) 空气中的微塑料污染。2016 年 Dris 等^[56]对室内外空气中的微塑料进行了检测,发现室内空气的微塑料浓度远高于室外,纤维浓度达 1~



60 p/m³, 沉降在室外的微塑料能够通过地表径流进入淡水环境, 而沉降在室内的微塑料则可能在清洁过程中进入污水系统。据统计, 在巴黎每年约有 3~10 t 的塑料纤维沉降至城市表面^[57]。空气中的微塑料主要来自纺织业、轮胎磨损或者城市灰尘, 室内较常见的污染源则包括家居用品以及建筑材料等, 这些微塑料颗粒最终被人体吸入或散至其他各处^[58]。在进行检测时, 空气中的微塑料污染被视为分析过程中的主要问题。即使采取必要的防范措施, 在空白样品中仍然能够检测到来自实验室空气中的微塑料^[59-61]。可以预见饮用水随时可能受到空气污染。

(4) 生活中的微塑料污染。生活中的某些塑料制品会向水中释放微塑料。有研究表明, 在温度大于 40 °C 的条件下, 即使食品级塑料仍会向水中释放有毒物质^[62]。Hernandez 等^[63]还发现, 单个茶叶包的塑料包装在泡茶过程中将释放约 11.6×10⁹ 个微塑料和 3.1×10⁹ 个纳塑料, 这些塑料能对无脊椎动物的行为产生一定程度的影响。由此可见, 饮用水是微塑料进入人体的重要媒介之一。

4 研究展望

尽管微塑料污染在饮用水中普遍存在, 然而目前尚无研究证明其对人体可能产生的危害。认识微塑料被摄入后的对人体的潜在影响以及深化对微塑料的毒理学研究是十分必要的。由于水中微生物易附着于塑料表面生长, 是以需要对微塑料表面的生物膜组成进行进一步探究, 以判断其可能造成的健康风险。

在需要更多的研究进行佐证的同时, 还需要提出规范的操作流程, 采取得当的检测方法, 以提高实验结果的准确性。此外, 还应当建立可靠的检测方法实现对饮用水中纳米塑料的检测。一般认为, 颗粒的尺寸越小, 其具有的生物毒性越大^[64]。因此, 明确饮用水中纳米塑料的存在水平具有重要意义。

当前, 有关饮用水处理流程中微塑料浓度水平变化的研究仍然较为缺乏。从原水到龙头水, 检测各阶段水中微塑料的浓度有助于明确其来源及去向, 掌握各处理构筑物对微塑料的去除效果以及处理输配过程中可能产生微塑料的环节。

参考文献

- [1] Geyer R, Jambeck J R, and Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3: e1700782.
- [2] Plastics Europe. Plastics—the facts 2019. An analysis of European plastics production, Demand and Waste Data[R/OL]. <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.
- [3] Barnes D K A, Galgani F, Thompson R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1985–1998.
- [4] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [5] Von M N, Burkhardt-Holm P, and Köhler A. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(20): 11327–11335.
- [6] Mato Y, Isobe T, Takada H, et al. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(2): 318–324.
- [7] Wu X, Pan J, Li M, et al. Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm[J]. *Water research*, 2019, 165: 114979.
- [8] Koelmans A A, Mohamed N N H, Hermesen E, et al. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality[J]. *Water Research*, 2019, 155: 410–422.
- [9] Ossmann B E, Sarau G, Holtmannspötter H, et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water[J]. *Water Research*, 2018, 141: 307–316.
- [10] Schymanski D, Goldbeck C, Humpf H, et al. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water [J]. *Water Research*, 2018, 129: 154–162.
- [11] Mason S A, Welch V G, and Neratko J. Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2018, 6: 407.
- [12] Kosuth M, Mason S A, and Wattenberg E V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt[J]. *Plos One*, 2018, 13(4): e0194970.
- [13] Strand J, Feld L, Murphy F, et al. Analysis of microplastic particles in Danish drinking water[R/OL]. (2018-9)[2020-2-25]. <http://dce2.au.dk/pub/SR291.pdf>
- [14] Mintenig S M, Löder M G J, Primpke S, et al. Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water



- sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 631–635.
- [15] Rocha-Santos T, Duarte A C. A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2015, 65: 47–53.
- [16] 杨东琪. 环境样品中微塑料理化特征的检测和表征方法[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [17] Eriksen M, Mason S, Wilson S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1): 177–182.
- [18] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6): 3060–3075.
- [19] Shim W J, Song Y K, Hong S H, et al. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 113(1–2): 469–476.
- [20] Kuptsov A H. Handbook of fourier transform raman and infrared spectra of polymers[M]. Elsevier Science & Technology, 1988.
- [21] Song Y K, Hong S H, Mi J, et al. Occurrence and distribution of microplastics in the sea surface microlayer in Jinhae Bay, South Korea[J]. *Archives of Environmental Contamination Toxicology*, 2015, 69(3): 279–287.
- [22] Löder M G J, Kuczera M, Mintenig S, et al. Focal plane array detector-based micro-Fourier-transform infrared imaging for the analysis of microplastics in environmental samples [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(5): 563–581.
- [23] Hanvey J S, Lewis P J, Lavers J L, et al. A review of analytical techniques for quantifying microplastics in sediments[J]. *Analytical Methods*, 2017(9): 1369–1383.
- [24] Tagg A S, Sapp M, Harrison J P, et al. Identification and Quantification of Microplastics in Wastewater Using Focal Plane Array-Based Reflectance Micro-FT-IR Imaging[J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(12): 6032–6040.
- [25] Martin G J L, Gunnar G. Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics—A critical appraisal [M]. Switzerland: Springer International publishing, 2015.
- [26] Lenz R, Enders K, Stedmon C A, et al. A critical assessment of visual identification of marine microplastic using Raman spectroscopy for analysis improvement[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 100(1): 82–91.
- [27] Cole M, Lindeque P, Fileman E, et al. Microplastic ingestion by zooplankton[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6646–6655.
- [28] Ivleva N P, Wiesheu A C, Niessner R. Microplastic in Aquatic Ecosystems[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(7): 1720–1739.
- [29] Van C L, Vanreusel A, Mees J, et al. Microplastic pollution in deep-sea sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 495–499.
- [30] Ubelaker D H, Ward D C, Braz V S, et al. The use of SEM/EDS analysis to distinguish dental and osseous tissue from other materials[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2002, 47(5): 1–4.
- [31] Vianello A, Boldrin A, Guerriero P, et al. Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2013, 130: 54–61.
- [32] Fries E, Dekiff J H, Willmeyer J, et al. Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy[J]. *Environmental Science—Processes & Impacts*, 2013, 15(10): 1949–1956.
- [33] Silva A B, Bastos A S, Justino C I L, et al. Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry A review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1017: 1–19.
- [34] Eerkes-Medrano D, Leslie H A, Quinn B. Microplastics in drinking water: A review and assessment[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, 7: 69–75.
- [35] Pivokonsky M, Cermakova L, Novotna K, et al. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 1644–1651.
- [36] Uhl W, Svendsen C, Eftekhardadkhah M. Mapping microplastic in Norwegian drinking water[R/OL]. (2018-10-21)[2020-2-25]. <https://www.researchgate.net/publication/328412920>
- [37] Wiesheu A C, Anger P M, Baumann T, et al. Raman microspectroscopic analysis of fibers in beverages[J]. *Analytical Methods*, 2016, 8(28): 5722–5725.
- [38] Zuccarello P, Ferrante M, Cristaldi A, et al. Exposure to microplastics (<10μm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study[J]. *Water Research*, 2019, 157: 365–371.
- [39] Zuccarello P, Ferrante M, Cristaldi A, et al. Reply for comment on "Exposure to microplastics (<10 μm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study by Zuccarello et al. *Water Research* 157 (2019) 365–371 "[J]. *Water research*, 2019, 166: 115077.
- [40] World Health Organization. Microplastics in drinking-water [R/OL]. (2019)[2020-2-25]. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo>
- [41] Wang W, Yuan W, Chen Y, et al. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 539–545.
- [42] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of*



- the Total Environment, 2018, 616: 1620–1627.
- [43] Zhang K, Gong W, Lv J, et al. Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam[J]. Environmental Pollution, 2015, 204: 117–123.
- [44] Wang W, Ndungu A W, Li Z, et al. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575, 1369–1374.
- [45] Zhao S Y, Zhu L, Wang T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 86(1–2): 562–568.
- [46] Su L, Xue Y, Li L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 711–719.
- [47] Xiong X, Zhang K, Chen X, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake—Qinghai Lake[J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 899–906.
- [48] Hendrickson E, Minor E C, Schreiner K. Microplastic abundance and composition in western lake superior as determined via Microscopy, Pyr-GC/MS, and FTIR[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 1787–1796.
- [49] Mani T, Hauk A, Walter U, et al. Microplastics profile along the rhine river [J]. Scientific Reports, 2015, 5 (17988): 1–7.
- [50] Baldwin A K, Corsi S R, Mason S A. Plastic debris in 29 Great Lakes tributaries: relations to watershed attributes and hydrology[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(19), 10377–10385.
- [51] Dris R, Gasperi J, Rocher V, et al. Synthetic and non-synthetic anthropogenic fibers in a river under the impact of Paris Megacity: sampling methodological aspects and flux estimations[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 157–164.
- [52] Vermaire J C, Pomeroy C, Herczegh S M, et al. Microplastic abundance and distribution in the open water and sediment of the Ottawa River, Canada, and its tributaries[J]. Facets, 2017, 2 (1): 301–314.
- [53] Sighicelli M, Pietrelli L, Lecce F, et al. Microplastic pollution in the surface waters of Italian Subalpine Lakes[J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 645–651.
- [54] Mason S A, Kammin L, Eriksen M, et al. Pelagic plastic pollution within the surface waters of Lake Michigan, USA[J]. Journal of Great Lakes Research, 2016, 42 (4): 753–759.
- [55] Winkler A, Santo N, Ortenzi M A, et al. Does mechanical stress cause microplastic release from plastic water bottles? [J]. Water Research, 2019, 166: 115082.
- [56] Dris R, Gasperi J, Mirande C, et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments[J]. Environmental Pollution, 2017, 221: 453–458.
- [57] Dris R, Gasperi J, Saad M, et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 104(1–2): 290–293.
- [58] Prata J C. Airborne microplastics: Consequences to human health? [J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 115–126.
- [59] Hermesen E, Mintenig S M, Besseling E, et al. Quality Criteria for the Analysis of Microplastic in Biota Samples; A Critical Review[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(18): 10230–10240.
- [60] Cable R N, Beletsky D, Beletsky R, et al. Distribution and Modeled Transport of Plastic Pollution in the Great Lakes, the World's Largest Freshwater Resource[J]. Frontiers in Environmental Science, 2017, 5: 45.
- [61] Miller R Z, Watts A J R, Winslow B O, et al. Mountains to the sea: River study of plastic and non-plastic microfiber pollution in the northeast USA[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 124(1): 245–251.
- [62] Bach C, Dauchy X, Severin I, et al. Effect of temperature on the release of intentionally and non-intentionally added substances from polyethylene terephthalate (PET) bottles into water: Chemical analysis and potential toxicity [J]. Food Chemistry, 2013, 139(1–4): 672–680.
- [63] Hernandez L M, Xu E G, Larsson H C E, et al. Plastic Teabags Release Billions of Microparticles and Nanoparticles into Tea[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53 (21): 12300–12310.
- [64] 汪冰, 丰伟悦, 赵宇亮, 等. 纳米材料生物效应及其毒理学研究进展[J]. 中国科学, 2015, 35(1): 1–10.



作者简介: 李伟英, 1968 年生人, 博士, 教授, 研究方向: 饮用水安全保障理论与技术、膜法(金属膜)水处理理论与技术研究、供水系统水质生物安全评价与控制技术研究。

通讯处: 200092 上海市杨浦区四平路同济大学 1239 号明净楼

E-mail: 1231wyktz@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019-10-30