

刘存辉, 杨文静, 张小玫, 等. 厕所黑水源分离及其资源化技术研究进展与展望 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(6): 2165-2173.

LIU C H, YANG W J, ZHANG X M, et al. Research advances and prospects of source separation and recycling technologies of toilet black water [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(6): 2165-2173.

厕所黑水源分离及其资源化技术研究进展与展望

刘存辉^{1,2}, 杨文静¹, 张小玫¹, 梁劲松¹, 陈乐¹, 房玮¹, 吴珍³, 张盼月^{1*}

1. 北京林业大学环境科学与工程学院, 水体污染源控制技术北京市重点实验室

2. 北京金河生态科技有限公司

3. 鄂尔多斯应用技术学院化学工程系

摘要 厕所是日常生活的基本设施, 在改善人类生活环境方面发挥了重要作用。厕所黑水主要由粪便和尿液组成, 含有大量有机质和氮、磷等营养物质, 其源分离与资源化处理逐渐成为一个亟待解决的环境和技术问题。通过文献调研和分析, 梳理了厕所黑水源分离和资源化处理的主要技术路线。围绕厕所黑水源分离, 综述了厕所黑水源分离新型便器设备及其应用范围; 根据粪便废水和尿液的特点, 系统总结了源分离后不同废水的分类处理与资源化技术的研究进展, 揭示了厕所黑水的污染控制和碳、氮、磷的有效回收是目前根本任务; 最后, 根据当前的研究与工程应用现状, 总结了厕所黑水源分离与资源化技术评估及绿色发展、多种技术的合理组合、集中化智慧化运行管理等方面面临的挑战, 并提出相关建议。研究旨在为因地制宜推广适宜的厕所黑水源分离及资源化技术的规模化应用提供理论依据和参考。

关键词 厕所源分离; 粪便废水; 灰水; 尿液; 资源回收

中图分类号: X703 文章编号: 1674-991X(2023)06-2165-09 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20221262

Research advances and prospects of source separation and recycling technologies of toilet black water

LIU Cunhui^{1,2}, YANG Wenjing¹, ZHANG Xiaomei¹, LIANG Jinsong¹, CHEN Le¹, FANG Wei¹,
WU Zhen³, ZHANG Panyue^{1*}

1. Beijing Key Lab for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University

2. Beijing Jinhe Ecological Co., Ltd.

3. Department of Chemical Engineering, Ordos Institute of Technology

Abstract Toilets are the basic facilities of daily life, playing an important role in improving human living environment. Toilet black water mainly consists of feces and urine with a large amount of organics and nutrients such as nitrogen and phosphorus, and its source separation and recycling are becoming an urgent environmental and technological issue. Through literature research and analysis, the main technical route of toilet black water source separation and recycling was sorted out. Focusing on the source separation of toilet black water, the new developed source separation equipment and their application scope were summarized. Based on the characteristics of fecal wastewater and urine, the research progress of main treatment and resource recycling technologies of different wastewater after source separation were analyzed systematically, and the fundamental tasks of pollution control and efficient recovery of carbon, nitrogen and phosphorus were revealed. Finally, the challenges on the assessment and green development of toilet black water source separation and recycling technologies, reasonable combination of multiple technologies, and centralized and intelligent operation and management were summarized and relevant suggestions were proposed, according to the current research and engineering application. This study aimed to provide theoretical basis and key reference for promoting the large-scale application of suitable source separation and recycling technologies of toilet black water in accordance with local conditions.

Key words toilet source separation; fecal wastewater; grey water; urine treatment; resource recovery

收稿日期: 2022-12-20

基金项目: 内蒙古自治区科技创新引导奖励资金项目(NM-KJCXYD-013); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110003)

作者简介: 刘存辉 (1989—), 男, 工程师, 研究方向为固废减量与资源化技术, liucunhui527@126.com

* 责任作者: 张盼月 (1967—), 男, 教授, 研究方向为固废减量与资源化技术, panyue_zhang@bjfu.edu.cn

厕所是人类生活必不可少的设施之一,也是卫生防病最重要的设施之一。在我国,厕所设施已经得到普遍的改善,在提高居民生活质量、改善居民生活环境等方面发挥了重要的作用^[1]。然而,厕所也是一个污染源,即便是卫生条件相对较好的城市,在其边缘地区也存在粪便不经过处理或仅经过化粪池简单处理后排放的情况^[2]。因此,在大力推进生态文明建设的大背景下,寻求有效的厕所废水处理方式迫在眉睫^[3]。

目前,集中收集处理厕所废水是应用最广泛的处理方式,即粪便、尿液与其他废水(如盥洗水)由管网统一收集,经处理达到一定标准后排放,该系统主要包括水冲便器、管网、末端处理设施等^[4]。根据产生来源及特征,厕所废水可分为黑水和灰水。灰水主要由盥洗水组成,包括洗漱、清洁地面等的废水,污染物浓度较低。黑水来自于马桶,包含粪便、尿液和冲洗水的混合物,含有大量有机质和氮、磷等营养物质。为了更好地控制分散型的厕所废物污染,并从源头上进行资源回收,国内外学者提出了源分离技术,即从便器入手,将人粪、尿单独收集,储存与处置,使之不与其他污水混合,促进资源的回收与再利用^[5]。

目前,有关源分离生态卫生系统的技术研发与应用日趋活跃。如荷兰斯内克市某住宅区利用负压排水技术收集和传输厕所废水,采用常温厌氧消化处理,利用部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺去除沼液中剩余的氮,并利用鸟粪石沉淀工艺回收剩余磷^[6]。我国在政府科技计划、公益性机构等资助下实施了源分离技术的工程示范,如内蒙古鄂尔多斯郝兆奎生态小区和江苏常熟荷花梗村等的生态卫生系统对粪尿分开收集并进行生态化处理和再利用,整体达到零排放^[6]。笔者综述厕所黑水源分离技术和原理,总结厕所黑水源分离后粪便废水和尿液的处理与资源化回收技术的研究进展及应用现状,并展望厕所黑水源分离技术和资源化回收技术所面临的挑战。

1 厕所黑水源分离处理路线

厕所黑水源分离处理可以通过水和营养物质的回收实现近零排放,其处理的全流程如图 1 所示。源分离包括源分离型便器和分流管道两大基本要素,可实现厕所黑水收集、废物处理,从而完成厕所黑水资源回收^[7]。厕所黑水的含固率和污染物浓度较高,通过便器选择可以分别收集粪便废水和尿液废水,源分离后宜采用负压排水管道进行输送^[8];再根据粪便废水和尿液废水的特点选择合适的技术工

艺进行针对性处理,实现碳、氮、磷等营养物质的回收和利用^[7]。

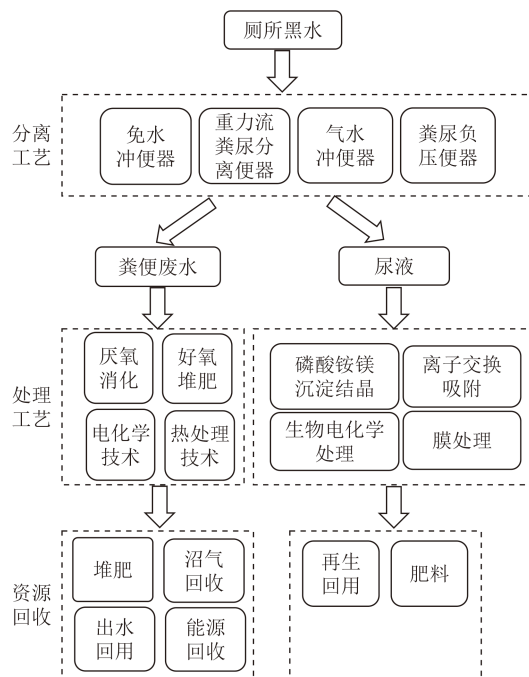


图 1 厕所黑水源分离流程及处理技术

Fig.1 Source separation process and treatment technologies of toilet black water

2 厕所黑水源分离设备及应用

为了构建厕所黑水源分离系统,学者们在源分离便器开发方面做了大量的研究工作。采用源分离便器实现黑水收集是构建源分离系统的首要步骤,可以降低储存、转运和处理黑水的难度。此外,一些替代技术的应用,如干厕所、分离式厕所和真空厕所等,可实现尿液和粪便的源头分离^[9]。目前工程应用较多的源分离便器主要有免水冲便器、真空负压便器以及气水冲便器等^[10],这 3 种单个便器的平均价格分别在 300、600 和 700 元左右,均低于传统的冲水式便器。有研究发现不同源分离便器中的粪便废水和尿液特性差异很大^[11]。与传统马桶和双冲水马桶相比,采用真空马桶可以获得更加浓缩的粪便,这通常有利于营养物质的回收。然而,Gao 等^[12]发现,由于氨抑制作用,真空马桶系统中粪便的生物甲烷潜能低于传统和双冲水马桶系统。选择合适的源分离便器有助于厕所黑水的收集和分离,以及后续厕所黑水中营养物质的充分回收。

2.1 免水冲便器

免水冲便器大多在传统厕所基础上改进,优点是不依赖供水供电设施、安装简易、运行维护方便。然而,由于几乎不使用冲洗水,排泄物直落于便

器下方容器中,使用的舒适性和便利性均不如其他节水型便器和常规水冲便器。因此,目前该类便器多适用于没有污水管网的地区,较难被发达地区接受。免水冲便器的典型代表是干式堆肥便器,主要处理工艺为在便器下方容器箱中加入锯末、秸秆等辅料,使落入的粪便在此进行发酵堆肥^[13]。目前在孟加拉国、南非等国家的农村地区也有一定数量的无水便器系统的使用,便器下方设有收集坑,用户排便后向坑内加入沙土和草木灰,辅助粪便进行堆肥,但该过程使用的降解菌种单一,难以实现粪便等废物的高效减量化^[14]。

2.2 气水冲便器

气水冲便器是在常规水冲便器基础上,增加了储能增压系统,通过空气和水的有效结合,用压缩空气推出高压水,提高瞬时流速及冲洗压力,实现清洁冲洗的目的。气水冲便器主要优势在于节水,其单次冲水量小于2 L,适用于给水压力较小的场景;同时,气水冲便器在卫生性、舒适性和便利性方面可与常规水冲便器媲美^[15]。河北省雄安新区安新县桥东村采用气水冲便器收集公厕粪尿废水,服务约500~700人/d,粪尿在化粪池储存后进行就地减量化与资源化处理。在保证同等冲洗效果下,气水冲便器冲水量高于真空负压便器30%~50%,因此如何突破以进一步减少用水量是气水冲便器广泛应用于源分离系统的主要限制因素。

2.3 真空负压便器

真空负压便器最早用于飞机、高铁、轮船等的厕所,其原理是利用真空泵或高压泵形成污水管道内的负压或真空环境,将便器内的粪污抽集到储蓄池。真空便器具有以下优势:1)节水和缩容减量。真空负压厕所冲洗的耗水量仅为0.6~1.0 L/次,较传统抽水马桶(冲洗水量为6~12 L/次)节水超过80%,浓缩粪污污染物浓度5~6倍以上。2)隔臭。排污时,真空厕所利用负压作用在短短几秒钟内将粪污连同异味一起排走,并利用真空实现隔臭。3)管道布置简便。管道内的输送不依赖于重力,使管道走向几近任意,且管道直径较重力排放的管道小很多。真空负压便器的主要缺点在于真空泵站建设导致投入成本较高,便器及机电设备运行维护要求较高^[10]。德国吕贝克斯市某住宅区利用负压系统将厕所粪污与灰水分离,灰水通过植物净化池后直接渗入地下或者排入排水渠;浓缩厕所粪污与日常生物垃圾(厨余废物等)经过高温杀菌处理后用于厌氧消化产沼气,沼气用来产热发电;发酵之后富含高浓度营养物质的沼液和沼渣作为肥料用于农业生产。在

我国北京、江苏常熟、河北邯郸等地,也采用真空负压便器开展了一些工程应用^[16],但该项技术尚无大面积推广的案例。如何有效降低设备和运行成本,是真空负压便器技术发展的核心问题^[17]。

3 粪便废水特点及处理技术

粪便废水中富含大量有机物、氮磷营养元素以及致病微生物^[18]。研究发现,粪便废水水量虽然只占生活污水量的约30%,却包含了其中约51%的化学需氧量(COD)、91%的氮、78%的磷和大部分病原菌^[19]。粪便废水中的固体有机物和氨浓度很高,其中COD约800~3 500 mg/L,生化需氧量(BOD₅)约400~1 400 mg/L,固体悬浮物(SS)浓度约200~1 000 mg/L,总氮(TN)浓度约130~250 mg/L,氨氮(NH₄⁺-N)浓度约100~300 mg/L,总磷(TP)浓度约20~60 mg/L^[20]。粪尿经便器源分离后,对粪便废水进行处理并回收其营养元素被认为是提高污水处理可持续性发展的关键环节,同时有助于改善水体富营养化,具有良好的环境效益和经济效益。在处理粪便废水时,除了碳与营养元素的处理和回收,还需要注意病原体,这些病原体如果不能有效灭活,可能造成人类健康风险^[21]。目前处理粪便废水的主要方法包括厌氧消化、好氧堆肥、热处理技术及电化学技术等。

3.1 厌氧消化

在厌氧条件下,粪便废水在厌氧微生物的作用下经过水解、酸化、甲烷化等过程被转化成沼气。然而,由于粪便废水碳氮比偏低,采用传统的厌氧产沼气技术进行处理时存在产气效率低等问题。向厌氧反应器中投加零价铁、活性炭等导电材料,与餐厨垃圾、农林废物共消化等方式,提高水解菌和甲烷菌丰度与活性,均可提升甲烷产率。Wang等^[22]探讨了不同配比下餐厨垃圾与粪污厌氧共消化的可行性,结果表明,当餐厨垃圾与粪污的有机物含量比为1:1时,累计产甲烷量最高,分别比餐厨和粪污单独厌氧消化提高26.4%和29.4%。Xu等^[23]研究发现,低剂量(0.5~1.0 g/L)的纳米零价铁对粪污厌氧消化产甲烷具有一定的促进作用,可能由于纳米零价铁降低了系统中的氧化还原电位并改善了系统的稳定性。厌氧消化不仅可回收沼气,还可以获得高附加值有机肥料。但厌氧消化技术仍存在运行周期长、有机物降解不彻底、沼渣沼液需进一步处理等弊端。Paulo等^[24]设计了一套粪便废水经蒸发浓缩后厌氧发酵,上清液再排入人工湿地的技术,经过垂直流人工湿地处理后,COD去除率达到90%以上,出

水中蠕虫卵和耐热大肠杆菌浓度低于《世界卫生组织污水、粪便和灰水安全利用指南》(2006)的要求。

3.2 好氧堆肥

粪便废水中的粪尿经固液分离后,通过好氧生物处理可将有机物转化为富含腐殖质的有机肥,同时杀死病原菌,满足一定的卫生要求。该技术由于操作简单已被广泛用于全球各地。好氧堆肥一般经历 3 个阶段:起始阶段(预处理)—高温阶段(一次发酵、二次发酵)—熟化阶段(肥料贮存)。堆肥温度一般控制在 55~60 ℃,周期在 5~12 d,单位体积堆料强制通风速率为 0.05~0.20 m³/min^[25]。由于厕所废物中含有高风险的病原体,在堆肥过程中需要达到足够高的灭活温度进行适当的消毒,以用作肥料或土壤改良剂。目前,常采用粪污与餐厨垃圾、植物生物质等共堆肥的方式,将粪污转化为稳定的腐殖质,并实现杀菌的目的。Germer 等^[26]探究了粪污与植物、餐厨垃圾小规模共堆肥,堆肥最高温度达到 70 ℃,其中 14 d 温度超过 55 ℃,温度和时间符合国际堆肥准则,大肠杆菌、粪肠球菌的数量削减均超过 99.99%。近年来,各种新型的粪污堆肥技术也相继开展,如真空马桶浓缩粪污的堆肥^[27]、将高温堆肥与乳酸发酵相结合的干式厕所^[28]、蚯蚓堆肥厕所^[29]等。但堆肥处理占地面积大,控制不好可产生臭气,同时堆肥生产的肥效不如化肥,如何推广应用存在一定问题^[30]。为了解决这一问题,粪污堆肥后可与菌类混合,制成颗粒有机肥,应用于农业生产。

3.3 热处理技术

热解技术、微波技术和水热碳化技术等也可以用于粪便废水中的粪污处理。其中,热解技术在缺氧和一定温度条件下将粪便污泥等分解成生物炭、生物气和生物油。低温热解主要产物为生物炭,一般用作土壤改良剂、燃料补充、吸附剂和催化剂等。Krueger 等^[31]研究表明,粪便污泥和农业废物经低温热解(300~500 ℃,1 h)后生成生物炭,较处理前体积减小 95% 以上,并固定浓缩了原料中的磷、钾、钙等元素,可用于酸性土壤的改良。微波技术利用波长为 1 mm~1 m、频率为 300 MHz~300 GHz 的非电离电磁辐射进行加热,具有功率输入准确并易控制、加热快速和均匀的特性。Mawoo 等^[32]将实验规模的微波装置应用于处理厕所粪便污泥,分别暴露在 465、1 085 和 1 550 W 的微波辐射下,不仅污泥体积减小 70% 以上,而且大肠杆菌浓度也降至检出限以下。但微波热处理能耗较高,尚无大面积示范应用,可在紧急情况下用于大量密集厕所系统的

粪污应急处置^[32]。此外,研究人员提出水热碳化处理粪污的方法,在密闭系统中,在一定温度(150~250 ℃)及自然压力下,以水为媒介将粪污水解、脱水、脱羧、缩聚和芳香化,生成高能量水热生物炭^[33]。研究发现,低温水热碳化有利于提高生物炭产量,最高为 50%~80%,且碳化后水热炭热值提升至 16~19 MJ/kg;水热碳化处理的液态副产物可采用厌氧消化技术(产气量约为 2.0 L/kg,以每 kg 粪便产甲烷量计)进一步处理,实现粪便的无害化和减量化^[34]。但该技术研究仅在实验室和中试规模开展,仍需要扩大反应器实现规模化生产,并开展粪污转化特征行为研究^[35]。水热液化技术近年来也逐渐被应用于粪污的处理,由于反应温度高,水热液化过程中粪污发生一系列热化学反应(如水解、脱羧)等,生成的目标产物为生物原油。厕所粪便单独水热液化的产油率和液化率最高分别为 34.4% 和 79.8%,添加粗甘油可分别提高至 40.6% 和 94.8%^[36]。对厌氧消化后产生的粪便消化物进行水热液化最高能够获得约 42%(质量浓度)的生物原油^[37]。

3.4 电化学技术

电化学技术常被用来对病原微生物进行灭活,为当前的消毒方法提供了一种可扩展、低成本和节能的替代方法,通常置于生物处理之后,使处理后的出水符合厕所冲洗水的回用标准。杜克大学开发了一种厕所现场处理系统,由固液分离、二次沉降、活性炭过滤以及电化学处理 4 个步骤组成。该系统在南非公共厕所进行了超过 8 个月的现场应用^[38],活性炭过滤器可进一步降低出水 COD 和总悬浮固体(TSS),为后续电化学工艺去除病原体奠定基础^[39]。电化学技术产生的·OH 等强氧化性物质直接在电极上氧化有机物,进一步强化 COD 和 TSS 去除,并持续灭活大肠杆菌和蛔虫卵等病原体。在印度,Welling 等^[40]报道了粪便废水电化学处理系统的工程案例研究,发现 10 个月的应用期内出水水质达到了当地污水排放标准,可用于冲厕所。但在实际应用中,电化学技术存在电极易腐蚀、电解氧化库伦效率低等问题。针对这些问题,Thostenson 等^[41]采用掺硼超纳米晶金刚石(BD-UNCD)电极对含氯化物和无氯化物的粪便废水进行电化学处理,发现该电极表面可吸附大量 Cl⁻,促进含氯物质的生成,使消毒效率提高 24%~124%;同时,该电极可为电化学过程提供结合位点并保持催化性能,使电极腐蚀降低至最低。

3.5 粪便废水处理技术对比分析

粪便废水资源化技术对比如表 1 所示。不同粪

便废水资源化技术均具有较好的处理效果,然而单一处理技术往往存在能耗高、出水无法达标等问题。随着国内外污水排放标准的逐步提高,综合处

理技术将逐渐成为未来发展趋势。因此,可以根据不同的应用场景和粪便废水类型设计综合处理技术方案,通过技术组合达到最佳的处理效果。

表 1 粪便废水资源化技术对比

Table 1 Comparison of fecal wastewater resource recovery technologies

资源化技术	处理方法	处理效果	数据来源
厌氧消化	餐厨垃圾与粪污厌氧共消化	累积产甲烷量313.2 mL/g (以VSS计)	文献[22]
	零价铁与粪便废水厌氧消化	甲烷含量为93.4%~99.2%	文献[23]
好氧堆肥	粪便、植物材料和食物垃圾共堆肥	大肠杆菌、粪肠球菌的数量削减均超过99.99%	文献[26]
	高温堆肥与乳酸发酵	获得土壤改良剂用于盆栽和田间施肥	文献[28]
热处理技术	粪便污泥和农业废物低温热解	生物炭较处理前体积减小95%以上,可用于酸性土壤的改良	文献[31]
	水热碳化处理粪污	生成高能量水热生物炭,可进一步加工作为电池阳极,同时可以去除废水中重金属和微污染物	文献[33-34]
	水热液化处理粪污	转化成生物原油,可作为重质燃料或加氢处理升级为运输燃料	文献[36]
电化学技术	固液分离、二次沉降、活性炭过滤以及电化学处理	粪便废水处理出水再利用,出水水质具有可靠的生物安全性	文献[38]
	固液分离、沉淀池、颗粒活性炭柱以及电化学反应器	出水达到当地污水排放标准,可用于冲厕所	文献[40]
	采用掺硼超纳米晶金刚石(BD-UNCD)电极进行电化学处理	提高消毒效率24%~124%,同时节约消毒能耗并使电极腐蚀降低至最低	文献[41]

4 尿液处理及资源化技术

尿液中的氮、磷和钾在生活污水中的占比分别为 80%、50% 和 50%,是一种具有高营养价值的潜在肥料^[42]。研究发现,全球排放的人类尿液中氮排放量每年约 3 000 万 t,并随着人口的增长而不断增加;预计到 2050 年,尿液中的磷排放量也会增加至 2009 年的 1.3 倍^[43]。因此有学者在污水源分离时,将粪、尿单独收集,以回收尿液中的资源^[44]。在对尿液进行处理与资源回收前应注意对尿液进行稳定化处理,因为尿液在分离、储存和运输过程中会发生尿素水解,使尿液 pH 升高至 9 左右,同时伴随氨挥发,以及尿液中钙和镁的碳酸盐或磷酸盐沉淀等^[45]。将尿液酸化至 pH 为 2~4 是一种较好的尿液稳定方法^[46]。目前,常见的尿液处理及资源化技术包括磷酸铵镁沉淀结晶、离子交换吸附、膜处理和生物电化学技术,为最大限度回收尿液中的资源,可联合使用这些技术^[47]。

4.1 磷酸铵镁沉淀结晶

磷酸铵镁沉淀结晶是指将尿液中的氮、磷以鸟粪石(MgNH₄PO₄·6H₂O)晶体形式析出,收集的鸟粪石可以作为一种优质缓释肥料^[48]。通过优化尿液 pH、过饱和度、镁、氮、磷摩尔比等,磷的回收率可超过 95%^[49-50]。目前鸟粪石结晶回收磷的工艺已在美国、荷兰、英国、日本、澳大利亚等国实现工程化。围绕降低镁盐和碱度的投加成本、提高结晶效率,学

者们开展了大量研究工作。据报道,以海水作为天然的镁源,可将结晶固体中的鸟粪石含量从 21% 增加到 94%^[51]。Sakthivel 等^[52]利用木灰作为镁源回收鸟粪石,尿液中磷的回收率接近 100%,但木灰中重金属的存在可能影响鸟粪石的质量。目前磷酸铵镁结晶工艺的生产成本仍高于鸟粪石的经济价值,其商业化挑战仍然存在。因此,基于鸟粪石结晶机制,开发成本更低、更绿色的鸟粪石氮磷回收技术具有重要意义。此外,鸟粪石结晶方法能够有效去除尿液中的磷,但是处理后上清液中仍剩余大量的氮、钾和微量营养元素,需要进一步处理。

4.2 离子交换吸附

离子交换吸附技术主要通过离子交换机制将尿液中的营养元素转移到吸附材料中。目前,研究最多的吸附剂是沸石、树脂和活性炭,由于价格便宜,沸石应用较多。斜发沸石能够吸附尿液中 90% 以上的铵和钾,不足之处在于其对钾离子只能吸附而不能回收以及对磷的回收效率较差。Sendrowski 等^[53]使用水合氧化铁纳米颗粒负载到阴离子交换树脂上,在不到 5 min 的时间内可吸附尿液中 97% 的磷酸盐,饱和的树脂可以用氯化钠和氢氧化钠溶液洗涤再生;剩余的磷可通过添加 Mg²⁺或 Ca²⁺源进行沉淀回收。Guan 等^[54]在酸性条件下利用 Fe₃O₄@ZrO₂,通过选择性吸附和再生从尿液中回收 97.5% 以上磷酸盐。与树脂和新型材料相比,沸石吸附 NH₄⁺-N 效

果良好, 吸附饱和的沸石可直接用作肥料, 是使用沸石作为吸附剂的另一个优势^[55]。因此, 在大多数情况下将沸石吸附与磷酸铵镁沉淀或冻融等多种方法相结合, 可以实现氮和磷的共同回收。

4.3 膜处理

膜分离技术可实现尿液处理与营养物质的回收, 被认为是尿液处理最具潜力的技术之一。废盐水溶液被认为是推动正渗透膜处理过程、回收尿液中营养物质的最佳低成本提取剂^[49,56]。采用正渗透膜可以在不消耗能量的情况下有效去除尿液中的激素和微污染物。正渗透膜与生物电化学技术耦合用于从尿液中回收营养物质, 可以去除高达 83.4% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 88.8% 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 其中将大部分氮磷利用反向流动的 Mg^{2+} 以鸟粪石的形式回收^[57]。纳滤膜可截留尿液中大部分药物残留体、雌性激素、磷酸盐和硫酸盐, 从而得到富含尿素和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的尿液^[58]。膜蒸馏技术利用聚四氟乙烯/聚丙烯、聚四氟乙烯/聚乙烯和聚偏氟乙烯膜等, 可实现尿液中营养物质的浓缩和水的分离, 聚四氟乙烯/聚乙烯膜在 70 ℃ 下的水通量最高, 可达到 60 L/(m²·h)^[59]。Zhang 等^[60] 开发了浸没式中空纤维膜接触器(HFMC), 从人尿中回收氨以获得液体氮磷复合肥料, 经济评估表明该肥料可获利 7.089 美元/L。针对膜污染问题, 有研究发现在进料尿液 pH 为 12 时, 氨捕获性能优异且膜污染最少。然而, 目前膜技术在尿液处理中的应用大多还处于实验室规模, 未来需要扩大实验规模, 并真正用于实践^[61]; 同时应不断优化运行参数, 提高污染截污效率和养分回收效率, 减少膜污染和能源消耗。

4.4 生物电化学处理

新兴的生物电化学系统(BES)在废水处理和资源回收方面展现出巨大的潜力。BES 利用微生物将

可生物降解污染物的化学能转化为电能或者其他化学物质^[57], 研究较深入的技术包括微生物燃料电池(MFC)和微生物电解池(MEC)技术。在典型的 BES 中, 电子由阳极降解有机物产生, 并经外电路传输到阴极进行氧化还原^[62]。耦合的电极反应产生一个内部电场, 该电场可以定向诱导溶液中带电离子(如 NH_4^+ 和 PO_4^{3-}) 的传输^[63-64]。此外, 氧化还原反应导致阴极电解液中积累 OH^- ^[65], 可促进鸟粪石结晶, 避免外加碱性物质的成本投入。Ieropoulos 等^[66] 首次证实 MFC 以尿液为原料能够产生电能, Barbosa 等^[67] 报道 MFC 的功率流密度为 0.95 W/m²; 研究人员在长期 MFC 研究中, 发现功率密度甚至可降低至 250 mW/m²^[43], 这一功率密度远远低于氢燃料电池产生的功率密度(5 000~6 000 W/m²)。除了用于产电, BES 还可以实现 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 的高度富集。Liao 等^[68] 构建了单室镁空气燃料电池(MAFC)处理水解尿液, 发现超过 99.48% 的磷以高纯度鸟粪石(98%) 的形式被回收, 同时其最大功率密度达到 552.32 mW/m², 成功实现了尿液中氮磷回收与同步产电。

4.5 尿液资源化技术对比分析

尿液是植物生长所需氮、钾、磷及其他微量元素的潜在来源。源分离后尿液需进行合理处理, 其中的营养物质才能被回收利用。表 2 比较了源分离后尿液的不同处理和资源化技术。尽管近年来使用生物电化学系统从源分离尿液中回收资源的潜力越来越突出, 但工艺放大和实际应用仍存在巨大挑战。鸟粪石沉淀是目前从尿液中回收磷的最常见和有效方法, 由于只能回收不到 16% 的氮, 因此常将其与氨汽提、吸收/吸附和蒸发相结合, 以提升氮和钾的回收率。这些处理技术虽然在实验室优化条件下能够有效地回收营养物质, 但由于投资和运营成本高、经济收益不确定性和可持续性等问题, 大部分处

表 2 源分离后尿液处理与资源化技术对比

Table 2 Comparison of treatment and recycling technologies of urine after source separation

处理技术	优点	缺点	产物	后续处理	数据来源	
磷酸铵镁沉淀结晶	磷的回收率高且纯度高	氮、钾及微量营养元素不能完全回收	鸟粪石	吸附/吹脱	文献[49-50]	
离子交换吸附	能耗较低,可直接应用	消耗大量的材料	富含氮、磷的材料	沉淀结晶	文献[53]	
电化学处理	磷的回收率高且纯度高	氮、钾及微量营养元素不能完全回收	鸟粪石	吸附/吹脱	文献[69]	
生物电化学处理	COD的去除率以及氮、磷的回收率高	电极成本和运行维护成本较高	污染物浓度低的浓缩尿液	鸟粪石结晶,用于产电	文献[68]	
膜处理	电渗析	体积小,操作简单	成本高、能耗大,且药物需要处理	污染物浓度低的浓缩尿液	营养物回收	文献[57]
	正渗透膜	有效地去除可溶性污染物,膜污染及能耗低	NH ₄ ⁺ -N去除率低,需要汲取液	污染物浓度低的浓缩尿液	沉淀结晶,吹脱	文献[57]
	纳滤膜	可选择性地分离尿液中的无机盐	膜污染严重,能耗高	富含各种营养物的溶液	营养物回收	文献[58]

理技术通常被联合使用。

5 结语

本文综述了实施源分离的节水型便器,总结了粪便废水和尿液的处理与资源化技术。通过厕所黑水源分离技术,可将粪便废水和尿液有效分离并收集,进而对分离后污染物进行分类分级处理,更大程度地实现厕所黑水的处理和资源化。未来研究中应关注以下几个方面。

(1) 尽管越来越多厕所源分离、粪污无害化及资源化技术在国内外开展了工程示范,但至今仍未对常规卫生模式形成挑战,甚至遭到示范应用区居民的反对。因此,在选择厕所黑水源分离系统时,应充分考虑使用者文化习俗、经济发展水平等,构建完整的技术实施计划和评估体系,并对源分离便器、厕所黑水处理工艺、回收产品价值、运行维护体系等进行全生命周期评价,实现厕所黑水处理的低碳和绿色发展。

(2) 大多数厕所黑水处理技术均存在不同的弱点,限制了其实际应用。未来的厕所黑水处理方案可选择多种处理技术的组合,如厌氧消化回收沼气、氮和磷回收、固体堆肥、液体循环利用等的组合,有效从厕所黑水中回收各种资源。在设计过程中应关注如何降低成本同时满足实际应用需求,并与传统污水处理系统进行经济效益对比。

(3) 由于专业技术人才短缺、管理组织水平不高等原因,一些厕所黑水源分离和资源化处理设施建成投产后未能发挥应有的处理功效。可从投融资、建设、运营等多方面着手,开展厕所黑水源分离与资源化设施的集中化和智慧化运行管理研究,建立长效保障机制,推动厕所黑水源分离及资源化技术与管理体系的发展。

参考文献

- [1] FU B, XIAO X A, LI J Z. Big data-driven measurement of the service capacity of public toilet facilities in China[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(9): 4659.
- [2] 沈峥, 刘洪波, 张亚雷. 中国“厕所革命”的现状、问题及其对策思考[J]. *中国环境管理*, 2018, 10(2): 45-48.
SHEN Z, LIU H B, ZHANG Y L. The current situation, issues and strategies of "toilet revolution" in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2018, 10(2): 45-48.
- [3] ZHOU X Q, SIMHA P, PEREZ-MERCADO L F, et al. China should focus beyond access to toilets to tap into the full potential of its Rural Toilet Revolution[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 178: 106100.
- [4] BRANDS E. Prospects and challenges for sustainable sanitation in developed nations: a critical review[J]. *Environmental Reviews*, 2014, 22(4): 346-363.
- [5] LAM L, KURISU K, HANAKI K. Comparative environmental impacts of source-separation systems for domestic wastewater management in rural China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 185-198.
- [6] 王洪良. 浓集生活废物资源化处理利用技术研究: 面向下一代乡村环境卫生模式构建[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [7] 尹文俊, 陈家斌, 刘勇锋, 等. 源分离厕所粪尿无害化及资源化技术研究进展[J]. *给水排水*, 2020, 56(增刊1): 493-499.
YIN W J, CHEN J B, LIU Y F, et al. Research progress on harmless and recycling technology of source separation toilet manure and urine[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 56(Suppl 1): 493-499.
- [8] 叶美瀛, 王平波, 刘宇奇, 等. 室外真空排水系统及其在我国农村生活污水治理工程中的应用[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(6): 1196-1201.
YE M Y, WANG P B, LIU Y Q, et al. Outdoor vacuum sewerage system and its application in rural sewage treatment engineering in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(6): 1196-1201.
- [9] MALILA R, LEHTORANTA S, VISKARI E L. The role of source separation in nutrient recovery: comparison of alternative wastewater treatment systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 219: 350-358.
- [10] 周燕, 梅小乐, 杜兵. 国内外生态厕所类型分析及其应用研究[J]. *北方环境*, 2013, 25(6): 21-25.
ZHOU Y, MEI X L, DU B. The analysis and applicable study on types of foreign and domestic ecological toilets[J]. *Northern Environment*, 2013, 25(6): 21-25.
- [11] WANG X M, CHEN J X, LI Z F, et al. Nutrient recovery technologies for management of blackwater: a review[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: 1080536.
- [12] GAO M J, ZHANG L, FLORENTINO A P, et al. Performance of anaerobic treatment of blackwater collected from different toilet flushing systems: can we achieve both energy recovery and water conservation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365: 44-52.
- [13] 党成成, 谢国俊, 邢德峰, 等. 无水冲生态厕所的类型和发展应用[J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(7): 28-32.
DANG C C, XIE G J, XING D F, et al. Types and development applications of non-flushing ecological toilets[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(7): 28-32.
- [14] 潘理黎, 吕伯昇, 严国奇, 等. 我国免水生态厕所的发展现状与展望[J]. *科技导报*, 2005, 23(11): 66-68.
PAN L L, LU B S, YAN G Q, et al. Current situation and prospect of ecological toilet without water in China[J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(11): 66-68.
- [15] 高铁山, 高兴瑞, 刘涛, 等. 一种气水混合型冲厕装置: CN211172264U[P]. 2020-08-04.
- [16] 黄碧捷, 陈书雪. 生物预处理与城市分质供水[J]. *中国环保产业*, 2007(9): 37-39.
HUANG B J, CHEN S X. Biological pretreatment and water quality based on water supply in urban area[J]. *China*

- Environmental Protection Industry, 2007(9): 37-39.
- [17] 张奇誉, 刘来胜. 农村分散式生活污水源分离技术现状与发展趋势分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(8): 20-24.
- ZHANG Q Y, LIU L S. An analysis of the current situation and development trend of rural decentralized domestic sewage based on source separation technology[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(8): 20-24.
- [18] 李子富, 王晓希, 王婷婷, 等. 城市生态卫生排水系统及其应用[J]. 建设科技, 2010(21): 44-47.
- LI Z F, WANG X X, WANG T T, et al. Urban ecological sanitation drainage system and its application[J]. Construction Science and Technology, 2010(21): 44-47.
- [19] 赵丙良, 袁林江, 张娜, 等. 改良型外循环厌氧反应器处理黑水特性研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(12): 86-89.
- ZHAO B L, YUAN L J, ZHANG N, et al. Treatment of blackwater with modified uasb reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(12): 86-89.
- [20] 施凡. 绿墙系统处理灰水和黑水的研究[D]. 温州: 温州大学, 2021.
- [21] WEN C X, DAI Z Q, CHENG F K, et al. Review on research achievements of blackwater anaerobic digestion for enhanced resource recovery[J]. Environment, Development and Sustainability, 2022: 1-31.
- [22] WANG H H, LI Z F, ZHOU X Q, et al. Anaerobic co-digestion of kitchen waste and blackwater for different practical application scenarios in decentralized scale: from wastes to energy recovery[J]. Water, 2020, 12(9): 2556.
- [23] XU R, XU S N, ZHANG L, et al. Impact of zero valent iron on blackwater anaerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2019, 285: 121351.
- [24] PAULO P L, AZEVEDO C, BEGOSSO L, et al. Natural systems treating greywater and blackwater on-site: integrating treatment, reuse and landscaping[J]. Ecological Engineering, 2013, 50: 95-100.
- [25] 王洪波, 孙登, 王晓昌. 以锯末为微生物载体的好氧堆肥反应器对人类粪便降解特性的研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(2): 43-46.
- WANG H B, SUN S, WANG X C. A study on the characteristic features of feces decomposition by using sawdust as microbial carrier for an aerobic composting reactor[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(2): 43-46.
- [26] GERMER J, BOH M Y, SCHOEFLER M, et al. Temperature and deactivation of microbial faecal indicators during small scale co-composting of faecal matter[J]. Waste Management, 2010, 30(2): 185-191.
- [27] OARGA-MULEC A, JENSSEN P D, KRIVOGRAĐ KLEMENČIČ A, et al. Zero-discharge solution for blackwater treatment at remote tourist facilities[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 798-805.
- [28] ANDREEV N, RONTETAP M, BOINCEAN B, et al. Treatment of source-separated human feces via lactic acid fermentation combined with thermophilic composting[J]. Compost Science & Utilization, 2017, 25(4): 220-230.
- [29] HILL G B, BALDWIN S A. Vermicomposting toilets, an alternative to latrine style microbial composting toilets, prove far superior in mass reduction, pathogen destruction, compost quality, and operational cost[J]. Waste Management, 2012, 32(10): 1811-1820.
- [30] ZHANG H Y, SCHUCHARDT F, LI G X, et al. Emission of volatile sulfur compounds during composting of municipal solid waste (MSW)[J]. Waste Management, 2013, 33(4): 957-963.
- [31] KRUEGER B C, FOWLER G D, TEMPLETON M R, et al. Resource recovery and biochar characteristics from full-scale faecal sludge treatment and co-treatment with agricultural waste[J]. Water Research, 2020, 169: 115253.
- [32] MAWIOO P M, RWEYEMAMU A, GARCIA H A, et al. Evaluation of a microwave based reactor for the treatment of blackwater sludge[J]. Science of the Total Environment, 2016, 548/549: 72-81.
- [33] XU X W, TU R, SUN Y, et al. The influence of combined pretreatment with surfactant/ultrasonic and hydrothermal carbonization on fuel properties, pyrolysis and combustion behavior of corn stalk[J]. Bioresource Technology, 2019, 271: 427-438.
- [34] FAKKAEW K, KOOTTATEP T, POLPRASERT C. Faecal sludge treatment and utilization by hydrothermal carbonization[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 216: 421-426.
- [35] FAKKAEW K, KOOTTATEP T, POLPRASERT C. Effects of hydrolysis and carbonization reactions on hydrochar production[J]. Bioresource Technology, 2015, 192: 328-334.
- [36] 王影娴, 吴向阳, 王猛, 等. 厕所粪便与粗甘油共液化制备生物原油研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 181-186.
- WANG Y X, WU X Y, WANG M, et al. Biocrude oil production via co-liquefaction of toilet feces and crude glycerol[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 181-186.
- [37] EBOIBI B E, LEWIS D M, ASHMAN P J, et al. Integrating anaerobic digestion and hydrothermal liquefaction for renewable energy production: an experimental investigation[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015, 34(6): 1662-1673.
- [38] SAHONDO T, HENNESSY S, SINDALL R C, et al. Field testing of a household-scale onsite blackwater treatment system in South Africa[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 135469.
- [39] ROGERS T W, ROGERS T S, STONER M H, et al. A granular activated carbon/electrochemical hybrid system for onsite treatment and reuse of blackwater[J]. Water Research, 2018, 144: 553-560.
- [40] WELLING C M, SASIDARAN S, KACHORIA P, et al. Field testing of a household-scale onsite blackwater treatment system in Coimbatore, India[J]. Science of the Total Environment, 2020, 713: 136706.
- [41] THOSTENSON J O, MOUROUVIN R, HAWKINS B T, et al. Improved blackwater disinfection using potentiodynamic methods with oxidized boron-doped diamond electrodes[J]. Water Research, 2018, 140: 191-199.

- [42] NAGY J, ZSENI A. Human urine as an efficient fertilizer product in agriculture[J]. *Agronomy Research*, 2017, 15(2): 490-500.
- [43] LARSEN T A, RIECHMANN M E, UDERT K M. State of the art of urine treatment technologies: a critical review[J]. *Water Research X*, 2021, 13: 100114.
- [44] SIMHA P, GANESAPILLAI M. Ecological sanitation and nutrient recovery from human urine: how far have we come: a review[J]. *Sustainable Environment Research*, 2017, 27(3): 107-116.
- [45] MARTIN T M P, ESCULIER F, LEVAVASSEUR F, et al. Human urine-based fertilizers: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(6): 890-936.
- [46] RANDALL D G, NAIDOO V. Urine: the liquid gold of wastewater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(2): 2627-2635.
- [47] ALEMAYEHU Y A, ASFAW S L, TERFIE T A. Nutrient recovery options from human urine: a choice for large scale application[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2020, 24: 219-231.
- [48] TANSEL B, LUNN G, MONJE O. Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: a review of magnesium-ammonia-phosphate interactions[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 504-514.
- [49] PATEL A, MUNGRAY A A, MUNGRAY A K. Technologies for the recovery of nutrients, water and energy from human urine: a review[J]. *Chemosphere*, 2020, 259: 127372.
- [50] 蒋善庆, 王晓昌, 李超, 等. 源分离尿液资源化利用与风险控制技术研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(5): 174-182.
- JIANG S Q, WANG X C, LI C, et al. Review on the resource utilization and risks control technologies of source separated urine[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(5): 174-182.
- [51] MERINO-JIMENEZ I, CELORRIO V, FERMIN D J, et al. Enhanced MFC power production and struvite recovery by the addition of sea salts to urine[J]. *Water Research*, 2017, 109: 46-53.
- [52] SAKTHIVEL S R, TILLEY E, UDERT K M. Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 419: 68-75.
- [53] SENDROWSKI A, BOYER T H. Phosphate removal from urine using hybrid anion exchange resin[J]. *Desalination*, 2013, 322: 104-112.
- [54] GUAN T, KUANG Y, LI X D, et al. The recovery of phosphorus from source-separated urine by repeatedly usable magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZrO}_2$ nanoparticles under acidic conditions[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105322.
- [55] TARPEH W A, UDERT K M, NELSON K L. Comparing ion exchange adsorbents for nitrogen recovery from source-separated urine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(4): 2373-2381.
- [56] LINARES R V, YANGALI-QUINTANILLA V, LI Z Y, et al. Rejection of micropollutants by clean and fouled forward osmosis membrane[J]. *Water Research*, 2011, 45(20): 6737-6744.
- [57] JIANG Q, LIU J, SONG X R, et al. Energy efficient bioelectro-concentration and recovery system of nutrients from human urine by integrating forward osmosis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 181: 106253.
- [58] PRONK W, PALMQUIST H, BIEBOW M, et al. Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine[J]. *Water Research*, 2006, 40(7): 1405-1412.
- [59] TUN L L, JEONG D, JEONG S, et al. Dewatering of source-separated human urine for nitrogen recovery by membrane distillation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 512: 13-20.
- [60] ZHANG J H, XIE M F, TONG X, et al. Ammonia capture from human urine to harvest liquid N-P compound fertilizer by a submerged hollow fiber membrane contactor: performance and fertilizer analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144478.
- [61] YU C Z, YIN W J, YU Z J, et al. Membrane technologies in toilet urine treatment for toilet urine resource utilization: a review[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(56): 35525-35535.
- [62] LOGAN B E, RABAEY K. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies[J]. *Science*, 2012, 337: 686-690.
- [63] CHEN X, LIANG P, ZHANG X Y, et al. Bioelectrochemical systems-driven directional ion transport enables low-energy water desalination, pollutant removal, and resource recovery[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 215: 274-284.
- [64] HOU D X, LU L, SUN D Y, et al. Microbial electrochemical nutrient recovery in anaerobic osmotic membrane bioreactors[J]. *Water Research*, 2017, 114: 181-188.
- [65] JIANG Q, SONG X R, LIU J, et al. *In-situ* enrichment and removal of $\text{Cu}(\text{II})$ and $\text{Cd}(\text{II})$ from low-strength wastewater by a novel microbial metals enrichment and recovery cell (MMERC)[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 451: 227627.
- [66] IEROPOULOS I, GREENMAN J, MELHUISH C. Urine utilisation by microbial fuel cells; energy fuel for the future[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012, 14(1): 94-98.
- [67] BARBOSA S G, PEIXOTO L, TER HEIJNE A, et al. Investigating bacterial community changes and organic substrate degradation in microbial fuel cells operating on real human urine[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2017, 3(5): 897-904.
- [68] LIAO M L, LIU Y, TIAN E L, et al. Phosphorous removal and high-purity struvite recovery from hydrolyzed urine with spontaneous electricity production in Mg-air fuel cell[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 391: 123517.
- [69] IKEMATSU M, KANEDA K, ISEKI M, et al. Electrochemical treatment of human urine for its storage and reuse as flush water[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 382(1): 159-164. ◇