

# 厕所系统排泄物处理与资源化厕所技术发展近况

许阳宇, 周 律, 贾奇博  
(清华大学 环境学院, 北京 100084)

**摘 要:** 厕所卫生及厕所污水的无害化与资源化问题困扰全球,当前水冲厕所与集中式处理造成大量的资源浪费。便器的重新设计与改进、污染物源头分离技术、粪便无害化与资源化、污水处理与资源回收利用等方面的进展将有效地改善环境卫生与能源问题。介绍了目前厕所产生的排泄物处理及资源化技术的原理、特点、适用条件等,对各种技术的优缺点进行了分析与总结,并对厕所未来的发展进行了展望。

**关键词:** 厕所; 卫生; 资源化; 无害化; 污染源头控制

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)06-0022-08

## State-of-the-art of Resource Recovery Toilet Technology: A Review

XU Yang-yu, ZHOU Lyu, JIA Qi-bo

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The hygiene of toilet and treatment of toilet wastewater have been a problem for all over the world. Nowadays, water flushed toilets and toilet with “end-of-pipe” treatment system lead to tremendous waste of resources. Researches have been made in several directions including redesign and development of toilet, source separation technology, feces treatment technology and resource recovery methods etc. Authors reviewed the principals, features, and application conditions of existing technologies. Meanwhile, the advantages and disadvantages of various technologies are analyzed and summarized, and the future development of latrines is prospected.

**Key words:** toilet; sanitation; resource recovery; harmless disposal; pollution control from source

近几年,习近平总书记大力倡导推进“厕所革命”,指出厕所问题不是小事情,是城乡文明建设的重要方面。农村改厕成为“十三五”时期改善农村人居环境的重点任务。2015年—2017年,国家旅游局已经连续三年通过政策引导、资金补助、标准规范等方式推动“旅游厕所革命”。由此可见,我国目前从乡村到城镇,以厕所为出发点,正在开展“厕所革命”,加强卫生设施建设,其广度和规模全球罕见。

联合国儿童基金会提出,厕所是衡量文明的重

要标志,改善厕所卫生状况直接关系到人民的健康和环境状况。联合国2016年1月1日正式启动了《2030年可持续发展议程》,议程确定了未来15年全球要努力实现的17项可持续发展目标,其中第2、6、12等项将水 and 环境卫生、可持续农业、可持续生产方式列为未来发展的重要目标,与“厕所革命”直接或密切相关。当前,在基础设施较完善的地区广泛使用的厕所、管网、处理设施相连的集中式处理系统需要大量的土地、能源和水源,而且其建设和维

护成本也非常昂贵。此外,这种集中处理模式投入大量物质和能量将主要来自于粪尿的 N、P、K 等可以回收利用的营养物质从污水中去除,是对资源与能源的巨大浪费。

成本较低的现有替代方案或因缺乏实用性,或因无法排除臭味且会吸引蚊虫,往往得不到用户的认可。厕所设计、厕所污水处理技术的突破性进展,还有废物利用新方法的出现,将有助于提升公共环境卫生质量。全球多家高校、科研单位、机构和企业长期以来对厕所系统及排泄物处理与资源化技术的研究表明,厕所系统及排泄物处理与资源化工作,系统性强,技术要求高,还涉及到文化、风俗等,综合性极强。为此,仅对厕所及排泄物处理技术的研究进展进行了归纳与总结,并按照研究对象的不同,将这些技术分为便器的改进和新型便器、粪便处理技术、废水处理技术三大类。下面对这三方面的研究进展进行分析介绍。

### 1 便器改造和新型便器的开发

传统的水冲式便器一般用水量为 3~6 L/次,而人体每日排泄 3~6 次,总排泄量仅为 1~1.5 L,大量的清洁水稀释少量的排泄物,造成了水资源的严重浪费<sup>[1]</sup>。同时粪尿中的氮磷等营养物也被稀释导致难以回收。此外,粪便和尿液成分差别巨大,尿液中含有人类排泄物中大部分的氮、磷、钾等营养物,同时细菌等病原体含量极少;但粪便中营养物含量相对较少,同时含有大量致病微生物、蛔虫卵等病原体。将粪便与尿液分开收集,有利于后续无害化与资源化。减少冲厕水量可减少水资源的浪费,同时也会提高后续资源回收利用效率。因此,作为生活污染源产生的源头设备,便器的发展是厕所系统进一步发展和污染源控制的基础,研究人员致力于厕所的粪尿源头分离、节水技术的发展,并产生了一些优秀的新型便器。

#### 1.1 专用粪尿分离结构的设计

##### ① 人工控制粪尿分离

由 Keim 等<sup>[2]</sup>发明的 Earth Auger Toilet 通过增加简单的机械装置,采用人力驱动实现粪尿分离与后续处理输送。这种设计通过人自行判断大小便,并人工进行机械操作将粪便和尿液分别输送到不同的后续处理设施中。图 1 为一种人力驱动源分离厕所(Urine Diversion Dry Toilet, UDDT),小便时尿液自动流入后续处理设施;排便后则需要人先踩

踏板,使粪便落入下方储存容器中,然后推动按压杆将粪便推送到后续的堆肥干化处理设施中。

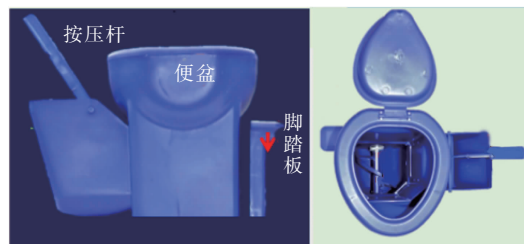


图1 人力驱动源分离厕所

Fig. 1 Human powered source-separation toilet

这种人力驱动厕所的主要优点是:无需水冲,节约水资源的同时提高后续堆肥处理的效率;脚踩和按压杆的设计使得人操作过程中不会与污染物接触;成本相对低廉,安装比较简便,可在经济欠发达地区推广和使用。但这种厕所也存在一定的不足:需要人工介入,降低了使用过程中的舒适度;与传统的便器之间存在着较大区别,需要用户改变已有的使用习惯;无水冲虽然节水,但卫生效果较差,若不能定期清洁维护,气味和污染问题依然存在。

##### ② 电控感应粪尿分离

由 Eawag 的研究人员<sup>[3,4]</sup>发明的蓝色分离厕所(Blue Diversion Toilet)则通过电控设备来实现源分离过程的自动化(见图 2)。该便器采用了 Koller 和 EOOS 公司发明的 iPee 感应器以及电控的尿液阀门,当感应器检测到尿液时自动控制阀门打开,使得尿液进入前端管道进行单独收集。大便时则阀门关闭,粪便及冲厕水由后端管道进行收集。

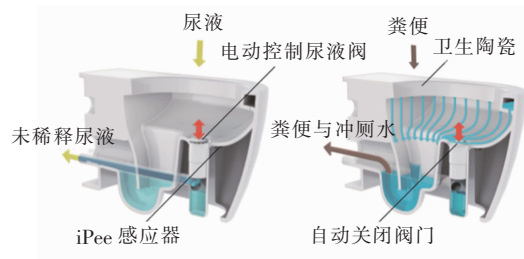


图2 电控感应粪尿分离厕所

Fig. 2 Source-separation toilet with electric controlled sensor

该厕所使用过程中无需手动控制,不改变用户使用习惯,感应器和电控阀门的存在使得厕所不仅能够将粪便和尿液分离,还能对尿液和冲厕水进行一定的分离,保证尿液不被稀释从而提高后续处理效率。该厕所的核心部件在于尿液识别感应器

iPee,其使用可靠性与使用寿命尚需进一步验证。但这种设计较为复杂,同时价格也较为昂贵,短时间内难以大规模的推广使用。

### ③ 机械传输式源分离免水冲厕所

湖南海尚环境生物科技股份有限公司研发了机械传输式源分离免水冲厕所。该厕所便器底部为机械传送带,用户使用后传送带运转将粪便输送至后方进行单独收集,而尿液则由传送带边缘流下,从而实现粪便和尿液的分离。其基本原理如图3所示。



图3 机械传输式源分离免水冲厕所

Fig.3 Mechanical transmission non-flush source-separation toilet

该便器可以将粪便与尿液实现较好的源头分离,无水冲可实现较好的节水效果,且基本不改变用户使用习惯。然而,在实际使用中,传送带如何长期保持清洁,以及无水封厕所如何实现无臭味仍然存在一定问题。另外,该厕所下部存在机械传动装置,在安装过程中与传统的便器差异较大,也使得该厕所的推广存在一定的限制。

## 1.2 便器的表面处理

通过对便器表面进行处理,增加便器材料的光滑性与疏水性可以有效地减少冲厕水用量,甚至达到不用水的效果。

### ① 激光表面处理

美国 Rochester 大学的 Garcell 等人采用脉冲飞秒激光对聚丙烯塑料进行处理,使得材料表面具有超疏水特性,表面接触角由原来的  $45^\circ$  增大至  $104^\circ$ ,而且处理后的材料上液体会直接滑落。因而,采用这种具有超疏水特性的材料可以实现少量冲水就能取得很好的清洁效果的目的,甚至无需冲水即可实现便器的自我清洁<sup>[5]</sup>。目前该研究尚处于试验阶段,激光表面处理尚不能产生可供应用的大面积的超疏水材料,同时对于有弧度的材料也难以进行直接表面处理。可预见的是,如果这种技术能够进行大规模的生产,其应用领域将十分广阔。

### ② 表面涂层

万若(北京)环境工程技术有限公司通过对普通便器表面涂加特氟龙涂层达到使便器表面光滑的目的,从而可减少冲厕水用量,保持便器表面清洁(见图4)。这种改进方式仅在便器表面进行涂层,即可实现便器性能的优化,对用户使用习惯、便器安装方法等要求较低,便于推广。目前该种便器处于小批量生产阶段,若能实现批量化生产,其成本可大大降低。

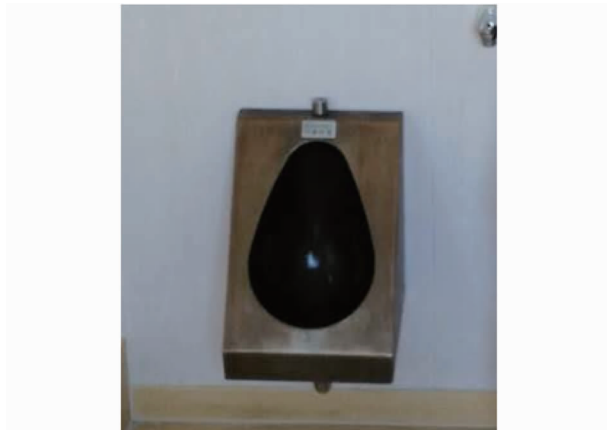


图4 经特氟龙涂层处理后的小便器

Fig.4 Urinal with Teflon surface

## 1.3 泡沫式节水便器

泡沫式节水便器见图5。



图5 泡沫节水厕所

Fig.5 Water saving foam toilet

该型便器的工作原理是在水中加入表面活性剂,并通过发泡机对其发泡,从而使其体积增长上千倍,产生体积大、质量轻、无污染的泡沫以代替大量的清洁水用于冲厕<sup>[6]</sup>。该便器在减少用水量的同时,粪便外包裹层层水膜,可以很好地阻止臭味扩散,保证厕间内空气清新。此外,泡沫厕所对于传统便器的改进主要在于增加发泡剂和发泡设备,成本低廉且不改变用户使用习惯,目前已有大量的实际应用案例。但泡沫厕所同样也存在一定的问题,若



使用频率较低,泡沫将快速蒸发,水封消失,厕所间内可能存在气味问题;同时,粪尿中混入某些表面活性剂可能会给后续资源化利用(尤其是生物处理)带来一定的干扰。

## 2 粪便处理技术

粪便处理中较为成熟的技术主要有堆肥与厌氧消化,这两种技术由于成本优势,被广泛用于人畜排泄物的处理中。然而这两种技术所需的处理时间一般较长,同时处理效果受环境影响大,并且存在二次污染的可能性。对此,新型的粪便处理技术也逐渐受到关注。

### 2.1 干化焚烧

Stokes 等<sup>[7]</sup>则提出了将粪便干化后进行焚烧,同时利用焚烧产生的热量对粪便进行干化,从而形成循环,达到粪便无害化与减量化的目的。便器原理如图6所示,排泄物经固液分离后粪便进入切碎机与挤出机,随后进行干燥。干燥器热量来自粪便的焚烧(启动需要一定的外加能源)。此外,该系统燃烧产生的热能还有一部分将被转化为电能,用于物料传输与破碎等过程。该过程理论上可实现能量自足,并大大减少粪便的清运量。根据计算,该系统每天粪便焚烧可产生热能 15 460 kJ,温度可达 600 ~ 800 ℃;热能转化为 4 769 kJ 电能,温度降低至 275 ℃;随后能量用于粪便干燥,这一过程消耗能量 2 494 kJ,温度降至 199 ℃;剩余能量用于液体的电化学消毒,这一过程需耗能 6 025 kJ,热源温度降至 160 ℃,并排除一定废热。

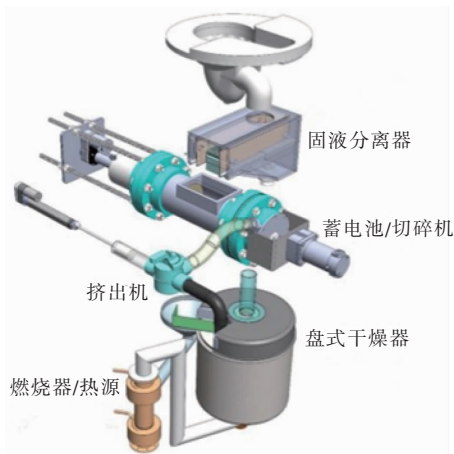


图6 干化焚烧厕所系统

Fig. 6 Schematic diagram of combustion toilet

该系统优点在于可实现能量自足,同时完成液

体的消毒。但不足之处在于,物料不足时系统难以持续运转,且每次启动需要一定的外加能源。同时液体仍需要进行后续处理。

### 2.2 超临界水氧化

Duke 大学的研究人员<sup>[8]</sup>提出了利用超临界水氧化技术对粪便污水进行处理。在超临界水中( $T > 374\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 21.8 MPa),有机物被快速分解为热量和  $\text{CO}_2$ , 该技术反应迅速,转化效率高,可产生清洁的再生水。其技术原理及流程见图7,效果见图8。

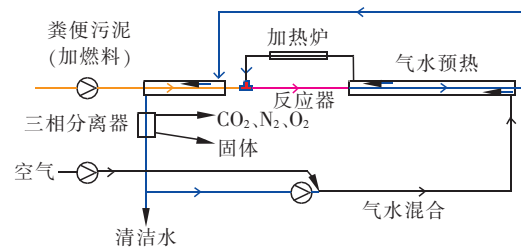


图7 超临界水氧化技术处理粪便污泥原理

Fig. 7 Schematic diagram of supercritical water oxidation in treating fecal sludge

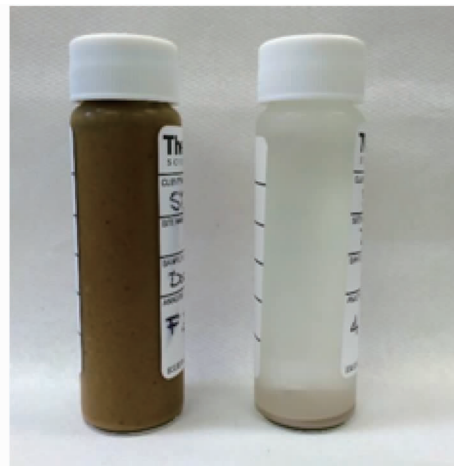


图8 超临界水氧化技术处理效果

Fig. 8 Treatment results of supercritical water oxidation

相对于其他热解或焚烧技术,该技术无需对粪便进行脱水干化,且不产生臭味。该系统以粪便污泥为原料,含固率为 7% ~ 15%,反应后 COD 去除率可达 99.9% 以上, TN 去除率约为 98%, TP 去除率约为 99%。该技术存在的问题主要在于反应条件苛刻(高温高压)、能耗高、造价昂贵等,因此距离实际应用尚存在一定的距离。

### 2.3 焚烧发电

Janicki Industries 公司研发的 Omni - Processor

是一座 300 kW 的综合供热供电发电厂(见图9),它以含固率为 5%~50% 的粪便污泥作为燃料进行发电,粪便燃烧所产生的热量通过流化砂床来产生高温蒸汽,从而推动蒸汽机发电,废热则用于粪便污泥的干化<sup>[9]</sup>。



图9 Omni-Processor 实际工程图片

Fig.9 The picture of onsite project of Omni-Processor

Omni-Processor 设计容量为 14 t 干物质/d,服

务人口为 30 000~50 000 人。理论上每个使用者每天所产生的粪便排泄物可以生产 0.16 kW·h 的电能。该系统所产生的能量较为可观,可以实现较好的经济效益。但不足之处在于规模较大,难以小型化,适用于人口密集的大型社区,否则将产生较大的运输成本。

## 2.4 水热碳化

来自 Loughborough 大学的团队以水热碳化技术对粪便进行处理,能够快速实现粪便的减量化和无害化。在进行碳化之前,粪便需要进行脱水,使其含水率 <50%。当碳化完成后,粪便温度可达 200 ℃,同时反应器内压力 >0.1 MPa,因此当打开反应器时,水分将迅速蒸发,从而无需再进行脱水<sup>[10,11]</sup>。该过程原理及样机实物如图 10 所示。该系统可以实现小型化,并且具有良好的减量效果。但对粪便含水率要求较高,结构单元较多使得运行维护较为困难。

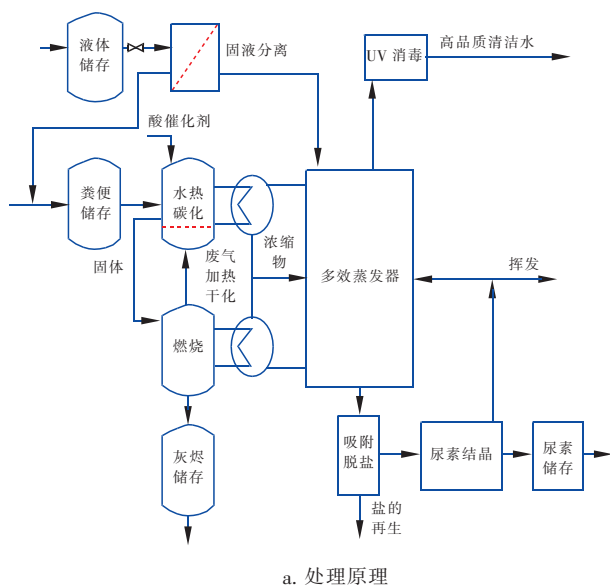


图10 用于粪便处理的水热碳化系统

Fig.10 Hydrothermal carbonization treatment system for fecal sludge

## 2.5 生产生物燃料

粪便中主要成分除水以外主要是大量的有机物,使得将其制成生物燃料成为可能。来自 Columbia University 的 Vajpeyi 等<sup>[12]</sup> 提出可以利用粪便污泥联合其他有机废物如餐厨垃圾、市政固体废物等生产生物柴油,在减少污染的同时产生可利用的能源,以及其他有价值的附加产物如挥发酸等。该技术的核心在于反应器设计及微生物种类及反应条件

的维护。该项目目前已进入中试阶段,适用于较大规模的有机废物的处理和转化。但有机物的来源以及运输问题使得该方法的使用受到一定限制。

表 1 总结了各种粪便处理及资源化技术的特点。对于新型处理技术,相对于传统堆肥与消化,在一些方面确实有着较为突出的优越性,但这些新技术要进行大规模应用,仍需克服一定的困难。根据不同的使用规模和使用特点,选择合适的技术。

表1 粪便处理与资源化技术比较

Tab. 1 Comparison of feces treatment and resource recovery technologies

项 目	成熟度	减量化	资源化效果	成本	反应条件	存在问题
堆肥	成熟	较差	产出有机肥	低	$T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 常压	受环境影响大,耗时长
厌氧消化	成熟	较差	产出有机肥	低	$T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 厌氧	受环境影响大,耗时长
干化焚烧	较成熟	好	产出能量	较高	$600 \sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 常压	原料不足难以启动
超临界水氧化	理论可行	较好	产出清洁水	高	$T > 374\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $218 \times 10^5\text{ Pa}$	需高温高压
焚烧发电	较成熟	好	产出电能	较高	含固率为 $5\% \sim 50\%$	高温、较大规模
水热碳化	理论可行	好	产出清洁水、肥料	高	高温高压,含水率 $< 50\%$	结构复杂,维护困难
制生物燃料	较成熟	较好	产出生物燃料	较高	常温常压	需要较大规模

### 3 污水处理技术

传统的厕所污水处理技术针对处理对象,由物理、生物、化学等不同的处理单元构成。由于尿液(黄水)中所含有的营养物浓度较高,可以作为很好的肥料来源,因而近年来黄水的资源化技术愈发受到重视,为此,便器多设计成源分离形式,将黄水和粪便(褐水)分别收集。目前研究较多、较为成熟的黄水资源化技术主要有鸟粪石结晶法、吸附法等,除此之外,新兴的黄水资源化技术也在不断出现。

#### 3.1 膜处理技术

膜技术因为其出水水质较好的特质,被广泛应用于污水处理中。在厕所污水的处理中,因污水成分较为复杂,污染物浓度高,使得膜技术的应用存在较大的难题。Eawag 的蓝色分离厕所采用重力驱动的生物反应器(BAMBi)对源分离尿液进行处理,其主要目的是产生清洁水<sup>[13,14]</sup>。纳滤膜对于有机物和病毒等具有较好的截留效果,但对氮的去除效果并不理想。为提高出水水质,Eawag 在纳滤后加上颗粒活性炭吸附过程,再对产生的清洁水进行消毒,其技术原理与流程如图11所示。该反应器出水水质可完全满足冲厕水要求,然而过程与设备均较为复杂,且存在能耗较高的问题(单个厕所能耗约  $0.74\text{ kW} \cdot \text{h/d}$ )。

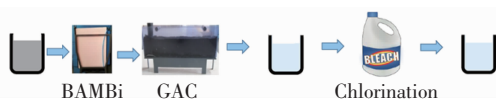


图11 蓝色分离厕所技术原理

Fig. 11 Schematic diagram of Blue Diversion Toilet

清华大学(本论文作者团队)对膜技术的利用更倾向于厕所污水中营养物质的回收,开展了正渗透黄水浓缩技术的研究。正渗透(FO)膜具有高截留率、耐污染的特性,利用高浓度的汲取液对尿液进行浓缩,可使得黄水体积大大减少,而营养物的浓度

大大提高,浓缩后的黄水可作为高效液态肥。同时,利用反渗透(RO)技术对汲取液进行回收并产生冲厕用的清洁水。该系统出水水质较高,且可以产生高效的液态肥,但同样也存在着造价与能耗均较高的问题(6蹲位厕所能耗约  $2.4\text{ kW} \cdot \text{h/d}$ )。

#### 3.2 电化学技术

在厕所中应用的电化学技术主要包括以去除污染物为主要目的的电解技术,以及去除有机物的同时产生一定能源的燃料电池的技术。其中电解技术以加州理工大学的 Hoffmann 团队为主<sup>[15]</sup>,将太阳能产生的电能加载在特制的电极上,对厕所污水进行电解,对有机物、色度等有很好的去除效果,产生的清洁水可回用于冲厕,其技术原理见图12。在太阳能产生的直流电作用下,阳极发生氧化反应,产生 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{HOCl}$ 、 $\text{ClO}^-$ 等离子,这些离子能够有效地杀灭细菌同时氧化有机污染物;阴极发生还原反应,产生 $\text{OH}^-$ ,可与钙、镁等离子反应生成沉淀。在外加电压为  $3.5\text{ V}$  的条件下,可在  $60\text{ min}$  内实现  $5\text{ lg}$  的微生物灭活。该技术环节较少,无需外加药剂,且处理单元紧凑,目前已进入商业化生产初期。该技术适用于一定规模的社区,并需要专业人员进行定期的检测,目前已朝着在线自动监测方向发展。

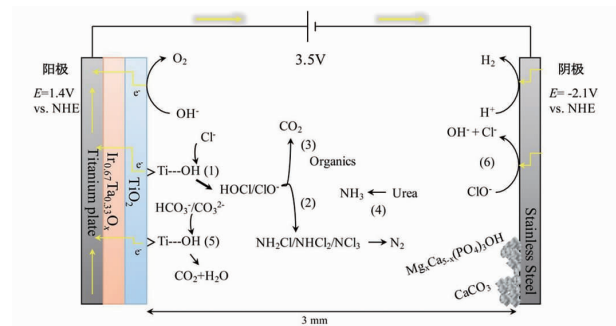


图12 厕所污水电解处理原理

Fig. 12 Principle of toilet wastewater treatment by electrolysis

而以微生物燃料电池技术(MFC)为核心的厕



所污水处理技术则以 Bristol Bioenergy Center 的 Gajda 团队为代表。该团队的“Urine - Tricity - III”利用 MFC 将尿液中的能量,通过微生物转化为电能,小型燃料电池可产生较高的能量密度( $24 \times 130 \mu\text{L}$  尿液产电  $333 \text{ A/m}^3$ ),现场运行实现了体积  $< 120 \text{ L}$  的尿液产电  $450 \sim 600 \text{ mW}$  (可用于厕所照明、手机充电等<sup>[16]</sup>)。在产生电能的同时,可实现尿液中有机的降解,去除率约为 50%;阴极可富集营养物质,产生肥料;而阳极可实现一定的致病菌灭活效果。该技术存在的不足主要在于:处理后的废水难以直接回用,需要进一步的处理;能量转化效率较低;使用过程中电极材料腐蚀较为严重等。

### 3.3 湿式氧化

湿式氧化法是在高温高压下将厕所污水中的病原体灭活,同时将有机物转化为可溶解易降解的小分子。来自新西兰皇家研究中心 SCION 研究所的 Andrews 团队采用该方法对户厕污水进行处理,处理后主要产出为难溶无机沉淀和含有溶解性物质的液体。该过程可将 90% 以上的固体降解为溶解性物质,同时产出无菌溶液。无机物沉淀中含有大量的磷,可作为肥料;而液体中则含有丰富的氨和挥发性脂肪酸 VFA 等。该方法主要原理如图 13 所示,

表 2 厕所污水处理与资源化技术对比

Tab. 2 Comparison of toilet wastewater treatment and resource recovery technologies

技术类别	成熟度	出水水质	资源化效果	成本	反应条件	存在问题
BAMBi	一般	可冲厕	产出回用水	高	常温常压	流程复杂,运行维护难,成本高
FO + RO	一般	可冲厕	产出有机肥,回用水	高	反渗透需高压	成本高,难以小型化
电解	较高	一般,仍需后续处理	产出水	较高	太阳能	技术难度较大,需专业维护
微生物燃料电池	较高	较差,仍需后续处理	产出电能	高	常温常压	出水水质差
湿式氧化	较低	较差,需后续处理	VFA, 肥料	—	高温高压	需要较大规模

## 4 未来展望

新型的便器及排泄物处理技术的发展对资源回收和物质循环利用有着重大的意义。在厕所未来的发展中,便器的改进作为前端技术,是提高后续处理效率的基础。便器改进主要方向是节水以及粪便和尿液的源头分离。节约冲厕水可大大减少后续污水的处理量,可通过便器的结构优化、表面材料改性、气体使用(负压、正压、气泡)等。表面材料的改性无需增加其他设备,且不改变原有的建造和使用习惯,是便器改进的重要方向。粪便的处理与资源化中,传统技术与新型技术各有优缺点,需针对具体边界条件进行相应技术的选择与组合。未来技术发展思路必将从“污染物去除”转为“资源回收”,将尿液

其不足主要在于:能耗较高,且间歇运行使得热量回收难以实现;产物受进水波动的影响较为不稳定。目前该技术尚处于原型研发阶段。

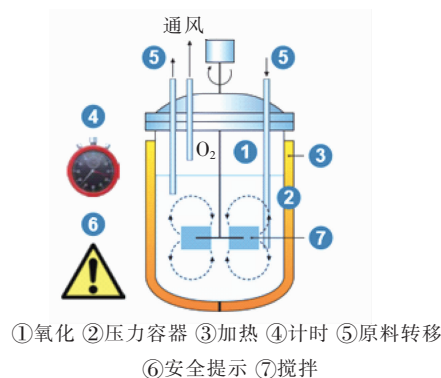


图 13 湿式氧化法处理尿液原理

Fig. 13 Principal of wet oxidation treatment of urine

表 2 总结了厕所污水处理技术的特点及存在的问题,目前新型的技术可从尿液中回收多种资源如水、肥料、电能等,相对于传统技术,达到了较好的资源化效果。然而这些技术由于难度较高,往往存在高成本、难维护的问题。在后续的研发与推广中,可以与其他技术相结合,进一步降低使用难度,提高可靠性,同时需进一步降低成本。

中的资源进行回用,而非耗费大量能量将之去除。

而在我国的“厕所革命”背景之下,主要目标是要解决农村地区、旅游景点及其他偏远地区的卫生问题。首先是厕所从“无”到“有”的过程,并且这些地区往往交通不便,技术管理水平也较低,所以应采用简单、可靠的设备,使得安装使用简便,能够解决基本的如厕卫生问题,满足用户对厕所的基本需求。因此,在传统水冲式便器基础上增加一定的节水措施是一种较为符合用户使用习惯的方式。第二,解决排泄物的安全性问题,建议采用分散式就地处理的方式,将相邻地区产生的排泄物进行半集中处理,可降低处理设施成本,提高处理效率。处理技术选择也应根据当地环境,采用简单、可靠、处理环节尽

量少的技术方案,降低使用与维护难度,重点考虑可靠性与经济性。第三,实现资源回收。在保障安全性的基础上,可将排泄物处理后作为肥料进行就近回用,减少化肥的使用,提升经济效益。

致谢:本研究得到比尔和梅琳达·盖茨基金会 Reinvent the Toilet Challenge 项目的支持,作者在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 褚俊英,陈吉宁,王灿. 城市居民家庭用水规律模拟与分析[J]. 中国环境科学,2007,27(2):273-278.  
Chu Junying, Chen Jining, Wang Can. Simulation and analysis on mechanisms of urban households water use [J]. China Environmental Science, 2007, 27(2): 273-278 (in Chinese).
- [2] Keim E K. Inactivation of Pathogens by a Novel Composting Toilet; Bench-scale and Field-scale Studies [D]. USA: University of Washington, 2015.
- [3] Larsen T A, Gebauer H, Gründl H, *et al.* Blue Diversion: A new approach to sanitation in informal settlements [J]. J Water Sanit Hyg Dev, 2015, 5(1): 64-71.
- [4] Etter B, Wittmer A, Ward B J, *et al.* Water Hub@NEST: A living lab to test innovative wastewater treatment solutions [A]. IWA Specialised Conference on Small Water and Wastewater System [C]. Athens: IWA, 2016.
- [5] Vorobyev A Y, Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications [J]. Laser Photon Rev, 2013, 7(3): 385-407.
- [6] 陈云祖. 大力推广泡沫厕所[J]. 中国科技信息, 2014, (6): 159-160.  
Chen Yunzu. Promoting bubble toilet [J]. China Science and Technology Information, 2014, (6): 159-160 (in Chinese).
- [7] Stokes C D, Baldasaro N G, Bulman G E, *et al.* Thermoelectric energy harvesting for a solid waste processing toilet [A]. SPIE Sensing Technology + Applications Conference [C]. Maryland: SPIE, 2014.
- [8] Duke University. Improving sanitation for developing countries [EB/OL]. <http://sanitation.pratt.duke.edu/>, 2017-01-24.
- [9] Roms W D M. Strategy to Achieve Energy and Water Sustainability in Latin America through Humanitarian Assistance and Disaster Relief Operations [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2016.
- [10] Danso-Boateng E, Shama G, Wheatley A D, *et al.* Hydrothermal carbonisation of sewage sludge: Effect of process conditions on product characteristics and methane production [J]. Bioresour Technol, 2015, 177: 318-327.
- [11] Afolabi O O D, Sohail M, Thomas C P L. Microwave hydrothermal carbonization of human biowastes [J]. Waste Biomass Valori, 2015, 6(2): 147-157.
- [12] Vajpeyi S, Chandran K. Microbial conversion of synthetic and food waste-derived volatile fatty acids to lipids [J]. Bioresour Technol, 2015, 188: 49-55.
- [13] Ravndal K T, Künzle R, Derlon N, *et al.* On-site treatment of used wash-water using biologically activated membrane bioreactors operated at different solids retention times [J]. J Water Sanit Hyg Dev, 2015, 5(4): 544-552.
- [14] Künzle R, Pronk W, Morgenroth E, *et al.* An energy-efficient membrane bioreactor for on-site treatment and recovery of wastewater [J]. J Water Sanit Hyg Dev, 2015, 5(3): 448-455.
- [15] Hoffmann M R. Development of a self-contained, PV-powered domestic toilet and wastewater treatment system [A]. Annual International Conference on Sustainable Energy and Environment Science [C]. USA: ECS, 2013.
- [16] Ieropoulos I, Gajda I, You J, *et al.* Urine—waste or resource? The economic and social aspects [J]. Rev Adv Sci Eng, 2013, 2(3): 192-199.



作者简介:许阳宇(1991-),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为污水处理与资源化。

E-mail: xu-yy14@mails. tsinghua. edu. cn

收稿日期:2017-07-18