

# 以正渗透膜为核心的资源型厕所系统设计与应用

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

**摘 要:** 人类排泄物中存在大量的资源,采用粪尿源分离便器对粪便与尿液进行收集,并分别采用厌氧消化与正渗透(FO) + 反渗透(RO)膜系统对粪便与尿液进行处理和资源化。介绍了这种厕所资源回收系统的设计及实际系统的运行效果。运行结果表明,分离膜系统对尿液中的营养物质(TP、K)截留率可达80%以上,产出的回用水水质优于《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2002)标准。正渗透技术作为一种较新的膜分离技术,在尿液的浓缩回用中有良好的应用前景。

**关键词:** 厕所; 粪便; 源分离; 正渗透; 资源化

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)08-0022-05

## Design and Application of Resource Recovery System Using FO as the Key Unit in Public Toilet: A Case Study

XU Yang-yu, ZHOU Lyu, JIA Qi-bo, SHI Yi-lei

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

**Abstract:** Human excreta contains large amount of resources. In this project, urine diversion toilet was used in the new kind toilet, after separated collection, feces and urine were respectively treated via anaerobic digest followed by forward osmosis and reverse osmosis (FO + RO) membrane system. The design parameters of the toilet system were introduced as well as its operational results. The results showed that the rejection of TP and K nutrient from urine was over 80%, and the reclaimed water met *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Water Consumption* (GB/T 18920 - 2002). As a new membrane separation technology, FO has a good application prospect in urine concentration and reuse.

**Key words:** toilet; human excreta; source separation; forward osmosis; resource recovery

人类排泄物中含有大量的资源,包括有机物、水、无机盐等,尤其是氮、磷、钾等营养元素更是植物生长所不可或缺的,将人类排泄物中的营养物质进行回收利用将有利于物质的循环利用,减少资源浪费。粪便(褐水)和尿液(黄水)组分差别极大,尿液中含有人类排泄物中大部分的氮、磷、钾等营养物,细菌等病原体含量极少;但粪中营养物含量相对较

少,含有大量致病微生物、蛔虫卵等病原体<sup>[1]</sup>。因此,将粪和尿液分开收集,有利于后续的资源化与无害化处理<sup>[2]</sup>。

正渗透(Forward Osmosis, FO)技术是一种绿色的膜技术,正渗透过程是在膜的一侧加入高浓度溶液(汲取液),另一侧则为需要浓缩的原料液,利用二者之间的渗透压差对原料液进行浓缩。其主要优

点有:无需外加压力,对膜强度要求低;膜污染倾向低,同时污染后的膜通过简单的处理即可恢复;对物质的截留率高等<sup>[3]</sup>。由于这些特质,使得正渗透膜技术可以适用于含污染物浓度较高的溶液的浓缩。尿液中含有大量的无机盐和有机物,正渗透膜技术对其进行浓缩后可作为高效液态肥,方便运输和使用。基于以上特点,本研究采用以正渗透膜技术为核心的新型资源型厕所,用于人类排泄物的处理与利用。

对于采用正渗透技术进行黄水的浓缩,Zhang等<sup>[4]</sup>使用美国 HTI 公司生产的 CTA 膜,采用模拟黄水对比了新鲜尿液和水解后尿液的浓缩和截留效果,结果表明正渗透膜对有机氮(尿素氮)的截留率仅为 20%~50%;对尿素水解后产生的氨截留率为 50%~80%;对磷和钾的截留率在 90% 以上。刘乾亮等<sup>[5]</sup>收集了新鲜尿液(pH 值=6)进行正渗透浓缩处理,发现正渗透膜对总有机碳、总氮和氨氮的截留率均可达到 98.5% 以上。美国国家航空航天局(NASA)采用两级正渗透系统对尿液进行处理并回收水资源,截留率可达 95% 以上,同时水回收率可达 98%,然而吨水能耗却高达  $25 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ <sup>[6,7]</sup>。前二者试验装置均为实验室规模,规模较小,且所采用原料为自配水或纯尿液,但实际工程中由于源分离便器往往难以实现尿液与粪便的完全分离,所收集的黄水成分一般较为复杂。而 NASA 的研究中,则侧重于对水资源的回收,其能耗过高,在日常生活中不适用。

尽管国内外已有一些利用正渗透技术对源分离尿液进行处理的研究,但一般均处于实验室阶段,规模较小,与实际工程存在较大差别。探讨了正渗透技术在资源型厕所应用中的设计方法与实际使用效果。

## 1 资源型厕所系统的原理

资源型厕所系统的原理如图 1 所示。系统采用真空源分离便器对粪便(褐水)和尿液(黄水)进行分开收集。所收集的粪便采用中温厌氧消化(平均 35℃)进行无害化处理。尿液则利用正渗透系统进行浓缩,浓缩后的尿液拟用作高效液态肥。采用 2 mol/L 的 NaCl 溶液作为正渗透汲取液,在正渗透过程中由于原料液中的水进入汲取液,导致汲取液浓度逐渐降低。被稀释后的汲取液则采用反渗透(Reverse Osmosis, RO)系统进行回收,反渗透浓水

返回汲取液罐进行循环利用,淡水则作为回用水用于冲刷等。

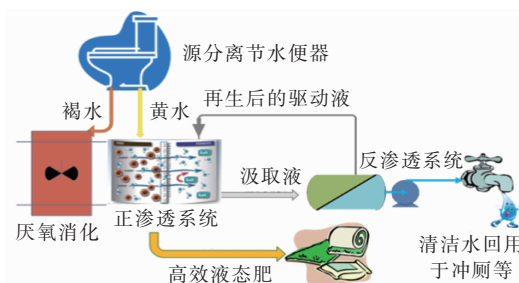


图1 以正渗透为核心的资源型厕所原理

Fig. 1 Schematic diagram of resource recovery system in public toilet

根据上述基本原理,建设了6蹲位的资源型厕所系统,该厕所位于北京市清华大学附属小学内,用以考察正渗透技术以及相关集成系统的使用效果。该型厕所设计容量为每天可接受100人次使用,峰值可达1000人次/d,设计最大日处理黄水量为150 L/d。

## 2 主要单元设备选择与工艺设计

### 2.1 源分离真空便器

为提高后续资源回收效率,便器的选择应满足粪便与尿液分开收集,同时最大限度地减少冲刷水量。根据这个原则,厕所系统选用了万若(北京)环境工程技术有限公司制造的尿液和粪便源分离真空便器。便器分为两个区域,前端为小便收集区,后端为粪便收集区,便器分别连接尿液和粪便的运输管道,由真空系统提供抽吸力,使用少量的冲刷水即可完成便器的清洁<sup>[8]</sup>,大便冲水量可低至1.0 L/次,小便为0.1 L/次。

尿液分离便器如图2所示,便器主要技术参数如表1所示。



图2 尿液分离蹲便器

Fig. 2 Urine diversion squatting toilet

表 1 尿液分离真空便器技术参数

Tab. 1 Technical parameters for urine diversion vacuum toilet

项 目	参数值
冲厕水量/(L·次 <sup>-1</sup> )	大便:1.0,小便:0.1
能耗/(kW·h·d <sup>-1</sup> )	0.14~0.18
厕纸等通过率/%	>99
负压范围/MPa	-0.06~-0.04

2.2 厌氧消化装置

为实现粪便无害化,采用中温厌氧消化对粪便进行发酵以去除其中所含的大量致病微生物。根据《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)设计厌氧停留时间在 25 d 以上。同时为增强罐内传质效果,采用循环泵对罐内液体进行抽吸。厌氧消化罐设计参数如表 2 所示。

表 2 厌氧消化罐设计参数

Tab. 2 Design parameters for anaerobic digester

项 目	参数值
有效容积/m <sup>3</sup>	1.5(半径为 0.6 m,高为 1.5 m)
储气容积/m <sup>3</sup>	0.5
停留时间/d	25
消化温度/℃	35
循环泵	MP-20RM, Q=17 L/min, H=30 kPa

2.3 正渗透系统

正渗透组件进水一侧为经源分离收集的黄水,一侧为高浓度盐水。由于实际黄水中存在较多颗粒物,为减少膜组件堵塞,增强传质效果,正渗透组件采用平板膜形式,经过实验室对多种正渗透膜的性能比较,作者自行二次加工的膜材料显示了较好的性能。为了增加膜组件的堆积密度,提高膜组件处理效率,在组件结构设计上借鉴了电渗析膜组件的形式。膜片间采用聚乙烯垫片进行间隔,同时引导液体在各膜片间隔流动。组件结构设计见图 3。

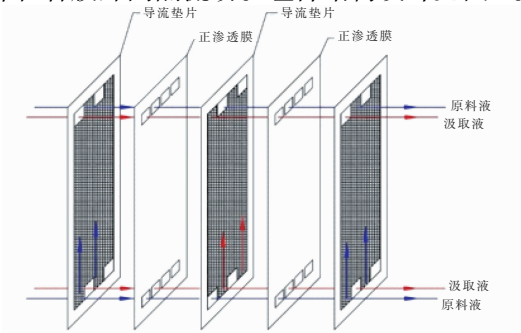


图 3 正渗透组件设计原理

Fig. 3 Schematic diagram of the FO module

正渗透组件主要设计参数见表 3。

表 3 正渗透组件主要设计参数

Tab. 3 Design parameters for FO module

项 目	参 数
膜材料	经过自行处理后的 DOW 膜
膜有效面积/m <sup>2</sup>	7.5
汲取液	2 mol/L 的 NaCl
膜通量/(L·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	2
操作压力/MPa	0.2
流动速率/(L·h <sup>-1</sup> )	3 500
垫片孔径/(mm×mm)	2×2

2.4 反渗透系统

由于反渗透进水为稀释后的汲取液,其盐浓度较高(1.0~1.5 mol/L),故反渗透所需压力较大。反渗透组件采用陶氏卷式膜,系统还包括高压泵、循环泵及自动控制系统。反渗透系统主要参数如表 4 所示。

表 4 反渗透系统主要参数

Tab. 4 Main parameters for RO system

项 目	参数值
膜材料	FELMETIC SW30, DOW
膜有效面积/m <sup>2</sup>	8.7
设计通量/(L·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	8
操作压力/MPa	6.8
高压泵	Q=420 L/h, H=6.8 MPa
循环泵	Q=1 000 L/h, H=190 kPa

该厕所系统经过收集和资源回收系统,主要可回收以下资源:①粪便厌氧消化可产生沼气和沼肥;②经正渗透浓缩后的黄水,可作为高效液态肥;③黄水中的水资源经正渗透汲取后,又经反渗透膜处理,最终呈现为高品质回用水,可用作冲厕、绿化等用水。

资源化系统使得厕所产生的污水变为具有较高经济效益、可循环利用的资源,即厕所成了资源中心,而不再是污染中心。

3 实际运行效果

3.1 资源回收系统总体运行效果

在实际运行中,运行效果满足预期要求,黄水浓缩倍数为 2.5 倍,产出的回用水可满足冲厕耗水量。粪便无害化可满足《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)中相关标准。厕所整体清洁无异味,使用者反馈良好。

资源型厕所和资源回收系统如图 4 所示。



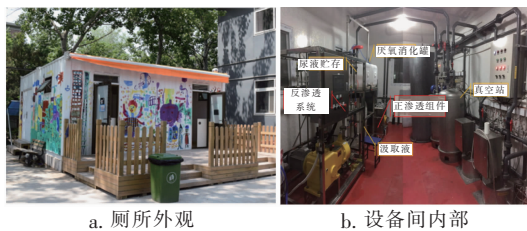


图4 资源型厕所和资源回收系统

Fig. 4 Full-scale toilet and its resource recovery system

使用过程中,厕所总体使用率低于预期,使得资源回收系统运转频率由原来设计的每日2 h降低为每周1次,每次4 h。总体运行效果见表5。

表5 厕所系统总体运行效果

Tab. 5 Overall performance of the toilet system

项 目		结 果
尿液浓缩效果	体积/(L · d <sup>-1</sup> )	浓缩前:10~30,平均:15; 浓缩后:4~12,平均:6
	pH 值	9.1~9.3
	N + P + K/(g · L <sup>-1</sup> )	浓缩前:5 ± 1,浓缩后:10 ± 2
回用水	体积/(L · d <sup>-1</sup> )	6~18,平均:9
	水质	满足 GB/T 18920—2002, TDS 略高,约(900 ± 100) mg/L
粪便	体积/(L · d <sup>-1</sup> )	<1
	无害化效果	蛔虫卵死亡率≥95%; 粪大肠菌值≥10 <sup>-4</sup> mL/个
	实际停留时间/d	>40

### 3.2 正渗透系统浓缩效果

正渗透膜组件对总磷(TP)和钾(K)的截留率较高,分别达98%和85%。对氮的截留率约60%,主要是由于黄水中氮的主要存在形式为氨氮,而其粒子体积较小,并且与水分子的性质较为接近<sup>[9]</sup>。正渗透膜组件对各种物质的截留率如表6所示。

表6 正渗透系统的浓缩效果

Tab. 6 Concentration effect of FO system

项 目	TP	TN	NH <sub>3</sub> - N	COD	K
浓缩前/(g · L <sup>-1</sup> )	2.11	2.46	1.63	4.03	0.58
浓缩后/(g · L <sup>-1</sup> )	4.14	3.16	1.78	6.96	0.97
截留率/%	97.9	64.5	54.7	86.3	84.1

实际应用中观察到黄水水质波动较大,组成成分与纯尿液存在较大差异,主要是由于粪尿分离式便器在使用过程中难以实现粪便与尿液完全分离,粪便及厕纸等可能会混入黄水中,使其成分发生较大的变化<sup>[10]</sup>。另外,实际黄水在储存过程中可能会存在一定的氮流失。

由于正渗透膜对氮的截留率较低,长期运行可

能会对汲取液造成污染,因此应采取相应的措施,通过调整运行参数、优化膜材料等方法提高截留率,也可以在汲取液中加入化学药剂以预防汲取液污染。

### 3.3 正渗透膜的污染与通量恢复

正渗透膜在汲取液为2 mol/L的NaCl的间歇运行中,初始通量为2.0~2.5 L/(h · m<sup>2</sup>),然而随着浓缩的进行,通量在半小时内迅速降至1 L/(h · m<sup>2</sup>)以下,4 h连续运行时平均通量仅为0.5~0.7 L/(h · m<sup>2</sup>)。由于原料较少,为保护膜系统,减少细菌繁殖,膜系统采用间歇运行方式,每次运行2~3 h后,即采用5 L清洁水对膜组件进行反冲洗,然后将膜组件浸泡于清洁水中,如此,下一个运行周期的初始通量可恢复至2.0 L/(h · m<sup>2</sup>)以上。若原料较为充足,膜系统可采用连续运行的方式,原料液持续运转对膜表面有一定的冲刷作用,可相对减少反冲洗频率,膜系统的效率也将得到提高。

为了进一步分析膜污染的具体影响,对使用后的膜进行了电镜扫描(SEM),结果见图5。对比图5(a)、(c)可以看出,膜在运行过程中,表面受到了污染,并且由通量下降的情况来看,膜污染发生的速度很快。但将膜表面图像进一步放大[对比图5(b)、(d)],可以发现膜的内部依然保持着较为清洁的状态,污染物基本上仅仅附着在膜的表面。因此,在每次运行结束进行反冲洗之后,膜通量能够迅速恢复。

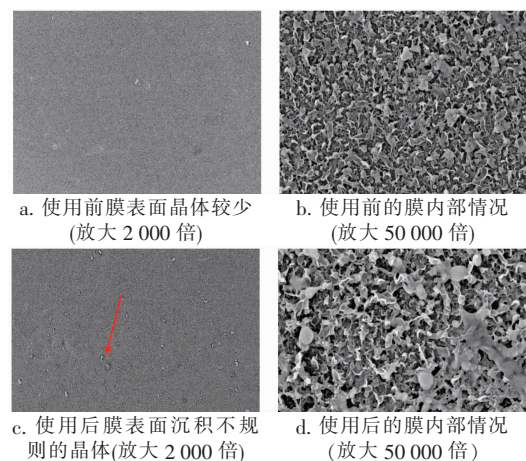


图5 使用后膜的电镜照片

Fig. 5 SEM pictures of the used membrane

由于正渗透膜的外加操作压力相对于其他膜过程而言非常低,故在膜污染及恢复上存在一定的优越性<sup>[7]</sup>。但是,如果在大规模的运行中,为了保证膜组件的效率,还是建议对黄水进行一定的预处理,以减缓膜污染导致的通量下降。

#### 4 结语

① 资源型厕所系统可以实现人类排泄物的无害化与资源化,是一种可行的粪便污水处理解决方案。

② 资源回收系统中使用的分离膜技术可以有效地截留源分离黄水中的营养物质,对磷和钾的截留率达80%以上,并且使黄水体积大大减少,方便后续作为肥料进行运输和使用。产生的清洁水完全可以满足冲厕回用的需求,同时粪便无害化效果也可达到相关标准。资源型厕所系统使得厕所从污染中心变为资源中心,对可持续发展有着重要的意义。

③ 正渗透技术作为一种较新的膜分离技术,在黄水浓缩中展现出良好的潜力,具有广阔的应用前景。其未来进一步发展方向是:膜材料的改进,提高截留率与膜通量。此外,在实际应用中,由于黄水难以彻底分离,往往存在较多的污染物,应对其进行一定的预处理,以保证正渗透组件的高效运行。

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] Jönsson H, Baky A, Jeppsson U, *et al.* Composition of Urine, Faeces, Greywater and Biowaste for Utilisation in the URWARE Model [M]. Sweden: Urban Water, Chalmers University of Technology, 2005.
- [2] Kvarnström E, Emilsson K, Stintzing A R, *et al.* Urine Diversion: One Step Towards Sustainable Sanitation [M]. Sweden: EcoSanRes Programme, 2006.
- [3] Cath T Y, Childress A E, Elimelech M. Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments [J]. *J Membr Sci*, 2006, 281(1/2): 70–87.
- [4] Zhang J, She Q, Chang V W C, *et al.* Mining nutrients (N, K, P) from urban source-separated urine by forward osmosis dewatering [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(6): 3386–3394.
- [5] 刘乾亮, 刘彩虹, 马军, 等. 正渗透膜处理源分离尿液效能与工艺运行特性 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(9): 16–19.
- Liu Qianliang, Liu Caihong, Ma Jun, *et al.* Efficiency and operation performance of forward osmosis membrane in source-separated urine treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(9): 16–19 (in Chinese).
- [6] Cath T Y, Gormly S, Beaudry E G, *et al.* Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space Part I. Direct osmotic concentration as pretreatment for reverse osmosis [J]. *J Membr Sci*, 2005, 257(1/2): 85–98.
- [7] Cath T Y, Adams D, Childress A E. Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space II. Combined direct osmosis, osmotic distillation, and membrane distillation for treatment of metabolic wastewater [J]. *J Membr Sci*, 2005, 257(1/2): 111–119.
- [8] 徐康宁. 基于磷和钾回收的黄水资源化处理技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- Xu Kangning. Combined Treatment Processes of Yellow Water: Aiming to Recover Phosphorus and Potassium [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011 (in Chinese).
- [9] Xue W, Tobino T, Nakajima F, *et al.* Seawater-driven forward osmosis for enriching nitrogen and phosphorous in treated municipal wastewater: Effect of membrane properties and feed solution chemistry [J]. *Water Res*, 2015, 69: 120–130.
- [10] Lee S, Boo C, Elimelech M, *et al.* Comparison of fouling behavior in forward osmosis (FO) and reverse osmosis (RO) [J]. *J Membr Sci*, 2010, 365(1/2): 34–39.



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: 2017–10–18