

以正渗透技术为核心的资源型公厕费用-效益分析

时义磊, 周律, 许阳宇
(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 从建设成本、运行维护费用及附加经济效益三方面,对以正渗透技术为核心的资源型公厕系统和传统公厕系统进行费用-效益分析,并利用经济净现值评价经济可行性。结果表明,相对于传统公厕,资源型公厕的固定建设成本较高,但可以通过获得液态肥产生附加经济效益,并且节约大量的运行成本,其经济可行性远大于传统厕所。

关键词: 费用; 效益; 公共厕所; 正渗透; 源分离; 资源化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)14-0014-06

Cost-benefit Analysis of Resource-type Public Toilets Based on Forward Osmosis as Key Unit

SHI Yi-lei, ZHOU Lyu, XU Yang-yu

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

Abstract: The resource-type toilet system and the traditional toilet system were compared from the three aspects including fixed construction cost, operating cost and additional economic benefit with the cost-benefit analysis. The economic net present value method was used to evaluate the economic feasibility of the two kinds of toilet. The results showed that the fixed construction cost of the resource-type toilet was higher than that of the traditional toilet. While, it could obtain the additional economic benefit from the liquid fertilizer and save a lot of the operating cost. The economic feasibility of the resource-type toilet is much larger than that of the traditional toilet.

Key words: cost; benefit; public toilet; forward osmosis; source separation; resource recovery

粪便污水的排放不仅会造成氮磷等营养物的浪费,还会增加城市污水的处理量和处理难度。成年人平均每天产生 1.5 kg 尿液和 0.14 kg 粪便,含有 11.5 g 氮、1.5 g 磷及 3.15 g 钾,其中约 88% 的氮、67% 的磷和 73% 的钾包含在尿液中^[1,2],如何从粪便污水中回收营养物质,提高社会、环境和健康效益,同时减少投资和运行成本,已经成为目前技术研究重点^[3]。

Ishii 等^[4]采用成本效益简单加和的方法,对比

分析了采用源分离系统配套鸟粪石结晶法收集回收尿液中 N、P 等营养物质的处理方法与传统的污水处理厂集中处理方法的成本差异,结果表明,二者成本相差在 13% 以内;Chakraborty 等^[5]设计了正渗透-纳滤(FO-NF)一体化系统用来处理砷污染废水,结果表明,一体化系统对砷的去除率达到 99% 时的成本仅为 1.57 美元/m³;Blandin 等^[6]以独立的反渗透技术为基准,分析了正渗透-反渗透(FO-RO)系统的经济可持续性,结果表明,FO-RO 系统

的成本较高,只有在较高水通量或大幅度降低运营成本的情况下,才能实现经济上的可持续性;Gao 等^[7]利用经济净现值法对比评估了以自来水冲厕、雨水冲厕、源分离结合自来水冲厕、源分离结合雨水冲厕、源分离结合堆肥五种公厕模式各自在中国农村地区推广的经济可行性,并结合具体情况给出相应建议。

利用真空源分离便器将粪(褐水)与尿液(黄水)分别收集,黄水在盐溶液的驱动下经正渗透膜富集处理,汲取液再经由反渗透系统处理获得回用水并回收盐溶液,褐水则通过厌氧消化技术进行处理,从而既达到粪便污水的无害化、减量化处理,又最大限度地回收了其中的营养物质,实现了资源的回收,符合目前的趋势,具有良好的发展前景。目前,针对此类新型资源型公厕系统以及正渗透等膜技术的经济效益及可持续性分析尚缺乏充分研究。基于目前已建成运行的以正渗透技术(forward osmosis, FO)为核心的资源型公厕系统,从固定建设成本和运行管理费用及其所能带来的经济效益等方面,分析了该资源型公厕系统在实际应用过程中的经济可行性,可以为日后的资源型公厕的推广建设提供参考。

1 研究方法

1.1 研究情景

考虑到不同地区的供排水基础设施条件的差异,在未来的推广过程中资源型公厕系统既可以选择部分依赖排水管网的模式,也可选择完全独立的模式。

不同厕所系统情景具体如图 1 所示。

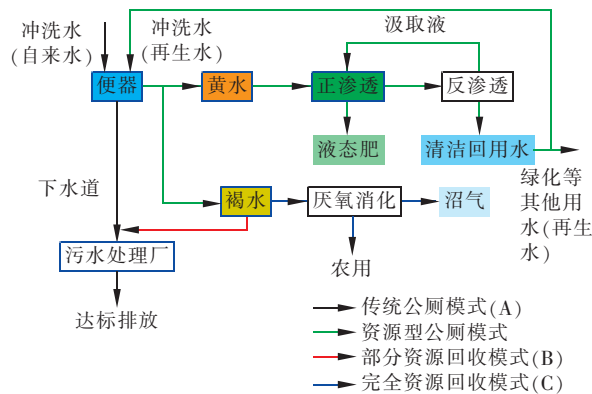


图 1 厕所系统研究情景

Fig. 1 Scenario of the toilet systems in analysis

图 1 中的模式 A 为传统的公厕情景,自来水冲厕后污水排放到市政管网,再经污水处理厂处理达标排放。模式 B 为部分资源回收情景,经过源分离分别收集黄水和褐水后,黄水通过正渗透系统进行浓缩获得高效液态肥(浓缩倍数可达 2.5 倍,肥效检测值见表 1),同时稀释后的汲取液经反渗透处理实现汲取液回收,反渗透的产水为清洁的回用水,可用作冲厕用水;褐水则进入下水道排入污水处理厂,经处理达标后排放,该模式适用于有给排水基础设施的地区。模式 C 为资源完全回收情景,在模式 B 的基础上,通过厌氧消化处理褐水,并利用正渗透-反渗透系统处理一部分雨水或地表水以获得全部冲厕用水,从而实现整个公厕系统与市政供水、排水管网的分离,形成独立的闭路循环,获得沼气的同时最大程度地回收氮、磷等资源。该情景不需要市政供水管网和下水道,是本研究目前实际应用的情况,具体的技术特征和分析详见笔者所在课题组的其他论文。

表 1 所得液态肥肥效检测结果

Tab. 1 Test results of the liquid fertilizer

项 目	检测值	标准值
有机物/(g · L ⁻¹)	70.2	250
总氮/(g · L ⁻¹)	21.3	38.4
总磷/(g · L ⁻¹)	1.6	—
总钾/(g · L ⁻¹)	4.9	—
N + P + K/(g · L ⁻¹)	27.8	38.4
氯离子/(g · L ⁻¹)	8.7	11.3
pH 值	9.7	4 ~ 8(1 : 250 稀释)

注: 检测单位为清华大学环境分析测试中心,标准为《有机液体肥料、有机-无机复混液体肥料质量安全要求》(DB 33/699—2008)。

1.2 分析及计算方法

本文在分析采用正渗透技术建设资源型公厕的经济可行性时,根据相关公共厕所设计建设标准[行业标准《城市公共厕所设计标准》(CJJ 14—2016)和北京市地标《公共厕所建设规范》(DB 11/T 190—2016)],在诸如建设形式、室内外装修等方面,假设资源型公厕采用与传统公厕相同的模式,二者所需费用相同,以此将问题简化,集中分析采用正渗透技术后在管网铺设等固定建设投资费用,以及投入使用后所需的运行维护费用和其他相关附加费用上二者的区别。

为了便于计算分析,假定在公园或旅游景点建设含 10 个蹲位的公共厕所(男女蹲位比为 2 : 3,6

个女便器,2个男大便器,2个男小便器),建设面积为50 m²,服务人数为1 580人次/d(男性800人次,女性780人次),假设大小便次数比例为1:5,则每天共1 316.67次小便、263.33次大便(大便为0.2 L,小便为0.2 L)^[8],公厕每日产生尿液263.34 L,粪便52.67 L。如前文所述,以正渗透技术为核心的资源型公厕,在固定建设投资上与传统公厕的区别主要集中在管网铺设上;在设备及运行费用上的区别则主要体现在资源型公厕需要正渗透等设备但运行过程中无需供水上;此外,资源型公厕通过正渗透技术富集黄水可以获得达标液态肥带来附加的经济效益,以及通过厌氧消化处理褐水获得沼气和沼渣肥。

由于公厕是公益类项目,目前大多数政府部门和国际机构都采用费用-效益分析作为公益性项目的主要评价方法。费用-效益分析中需要剔除转移支付的影响,并利用影子价格体系,确保分析中的价格能真实反映实际情况,同时将间接费用或间接效益等外部效果内部化,以便从整个国家或社会的角度全面分析项目的经济性。

在费用-效益分析中,经济净现值是工程项目对国民经济所作出的净贡献的最重要的绝对性指标,当该指标值小于零时,此工程项目不可行,当该指标值大于零时,且数值越大,则意味着此工程项目的贡献越大^[9]。

采用经济净现值法评估三种不同模式公厕的经济效益,其计算式如下:

$$ENPV = \sum_{t=1}^n C_t / (1+i)^t \quad (1)$$

式中 ENPV——经济净现值

n ——计算年限, a

C_t —— t 年总效益和总费用的差值, 万元

i ——社会折现率, 采用8%

2 结果与讨论

2.1 资源型公厕与传统公厕的效益分析

在不同地区(山地、平原等)采用不同厕所布局(品字形、U形、一字型等)时公厕的建设难度、铺设的管道长度、铺设难度均有所不同,造价也随之变化,结合具体工程,将厕所的土建加装修造价估算在0.24~0.30万元/m²范围内(以0.27万元/m²的均价计)。

以正渗透技术为核心的完全资源回收型公厕(模式C),基于源分离技术单独铺设管道收集尿液和粪便,进一步采用正渗透技术浓缩黄水,并采用反渗透技术从汲取液中获得干净的再生水回用作冲厕等厕所用水,无需外接排水管道。传统公厕(模式A)及部分资源回收型公厕(模式B)则根据相关设计标准选取适宜管道铺设。

在上述基础上分别分析三种公厕模式的效益及费用,结果如表2~4所示。由于部分外部效益对计算结果影响较小或难以量化,在进行效益及费用流量分析时并未完全计算所有间接效益。诸如,减少的城市给水设施费用;减少水污染造成的环境退化成本;节水带来的全球大气环境改善;减少污染物排放对当地生态环境质量的改善等。

表2 传统公厕(模式A)的费用-效益流量

Tab.2 Cost-benefit flows of the traditional toilet (Scenario A)

万元

项 目	费用	备 注
土建及装修	20.79	建筑面积为77 m ² (按要求取7.5 m ² /蹲位,外加2 m ² 工具间),费用根据具体工程(0.27万元/m ²)估算
管道造价	0.64	结合相关预算定额和当前各类管道的市场价格推算,小便器给水管为DN15聚丙烯管(20元/m×3 m),排水管为DN50承插塑料管(23元/m×3 m),大便器给水管为DN25聚丙烯管(30元/m×3 m),排水管为DN100承插塑料管(58元/m×3 m);另需接市政给排水管,根据相关要求和施工图,采用DN100(38元/m×18 m)和DN200(87元/m×22.5 m)不锈钢管以及相关的人工费用约1 400元
设备	0.92	装设普通蹲式大便器1 000元/个和挂斗式小便器600元/个
年供水及污水处理	0.66	用水量为3.03 m ³ /d(大便器4 L/次,小便器1.5 L/次),北京市公厕用水费用为6元/m ³ (含污水处理费为1.36元/m ³)
污水处理厂建设	0.99	污水量为3.34 m ³ /d,污水处理厂的平均建设费用为2 974.15元/(m ³ ·d ⁻¹)(统计22个处理至一级A的污水厂建设案例取平均值所得)
年运行维护	1.80	主要为人工费开支,1 500元/(月·人)

表3 部分资源回收型公厕(模式B)的费用-效益流量

Tab.3 Cost-benefit flows of the partial resource toilet (Scenario B)

万元

项 目	费用	备 注
土建装修	28.35	75 m ² 厕所和 30 m ² 设备房,根据具体工程(0.27 万元/m ²)估算
管道造价	0.59	结合相关预算定额和当前各类管道的市场价格推算,小便器给水管为 DN15 聚丙烯管(20 元/m×4 m),排水管为 DN50PVC 管(6.5 元/m×4 m),大便器给水管为 DN25 聚丙烯管(30 元/m×4 m),排水管为 DN100 的 PVC 管(21 元/m×4 m);另需接市政给排水管,采用 DN100(38 元/m×18 m)和 DN200(87 元/m×22.5 m)不锈钢管以及相关的人工费用约 1 400 元
设备	34.47	负压真空便器价格:大便器为 4 500 元/个,小便器为 600 元/个;结合具体工程推算真空站、正渗透系统和反渗透系统及为上述系统供电的太阳能发电系统设备费为 30.75 万元
年供水及污水处理	0.046	用水量为 0.21 m ³ /d(大便器 1.2 L/次,小便器 0.1 L/次,共计用水 447.66 L/d),产回收水为 237.00 L/d,北京市公厕用水价格为 6 元/m ³ (含污水处理费 1.36 元/m ³)
年运行维护、维修	1.74	运行维护费用主要为人工费及高科技设备使用的培训费,人工费约 2 000 元/a;对于高科技新设备的维修费取设备费的 5%,约 1.54 万元/a
年耗材料	0.40	包括肥料添加剂、消毒药剂、黄水稳定化药剂和膜污染控制药剂等,结合实际工程推算
年折旧	1.54	系统关键设备为陶瓷或金属材料,折旧年限取 20 年,平均年折旧,无残值
减少污水处理设施	0.88	污水产量为 368.662 L/d,减少 2.96 m ³ /d,污水处理厂的平均建设费用为 2 974.15 元/(m ³ ·d ⁻¹)
年液态肥效益	11.53	日产 158.00 L 液态肥(浓缩倍数为 2.5 倍),按 2 000 元/t 的市售有机肥价格及对应营养物质浓度估算 ^[10,11]

表4 完全资源回收型公厕(模式C)的费用-效益流量

Tab.4 Cost-benefit flows of the complete resource-type toilet (Scenario C)

万元

项 目	费用	备 注
土建装修	33.75	75 m ² 厕所和 40 m ² 设备房及 10 m ³ 储水池,根据具体工程估算
管道造价	0.18	结合相关预算定额和当前各类管道的市场价格推算,小便器给水管为 DN15 聚丙烯管(20 元/m×4 m),排水管为 DN50PVC 管(6.5 元/m×4 m),大便器给水管为 DN25 聚丙烯管(30 元/m×4 m),排水管为 DN100PVC 管(21 元/m×4 m)
设备	38.47	负压真空便器的价格:大便器 0.45 万元/个,小便器 0.06 万元/个;结合具体工程推算真空站、厌氧消化罐、正渗透系统、反渗透系统及为上述系统供电的太阳能发电系统设备费为 34.75 万元。比模式 B 多 1.5 m ³ 厌氧消化罐,1.5 万元/个×2 个;一组太阳能发电系统 1 万元/组×1 组
年运行维护、维修	2.54	运行维护费用主要为人工费及高科技设备使用的培训费开支。人工费为 2 000 元/a;对于高科技新设备的维修费为设备费的 5%,1.74 万元/a;每月需储水(雨水或地表水)5.06~7.58 m ³ ,费用为 500 元/月
年耗材料	0.60	包括肥料添加剂、消毒药剂、黄水稳定化药剂和膜污染控制药剂等,结合实际工程推算。因处理获得更多冲厕清洁水,故耗材比模式 B 大
年折旧	1.74	系统关键设备为陶瓷或金属材料,折旧年限取 20 年,平均年折旧,无残值
减少污水处理设施	0.99	详见模式 A
年液态肥效益	11.53	每日产生 158.00 L 液态肥(浓缩倍数为 2.5 倍),按 2 000 元/t 的市售有机肥价格及对应营养物质浓度估算 ^[10,11]
年沼气效益	0.003	褐水产量为 368.662 L/d,经厌氧消化可产沼气 0.11 m ³ /d,按 0.5~1.0 元/m ³ 的市场价格估算
年沼肥效益	0	经源分离收集的粪便中所含 N、P 等营养物质较少 ^[2] ,经厌氧消化后所产生的沼肥肥效较低,可用于附近的农业渔业,但不具备出售的可行性

2.2 经济可行性分析

综合上述成本收益分析,取社会折现率(i)为 8%(根据国家发改委和前建设部发布的文件规定,

对于具有长远环境保护效益的工程项目,宜采用低于 8% 的社会折现率^[12],由于公共厕所是具有长远环境保护效益的工程项目,故 i 取 8%),比较二者

在20年运行期限内的经济效益,结果见表5。

表5 资源型公厕与传统公厕经济效益比较

Tab.5 Comparison of ENPV between the traditional toilet and the resource-type toilets 万元

厕所类型	ENPV
传统公厕(模式A)	-47.49
部分资源回收型公厕(模式B)	14.09
完全资源回收型公厕(模式C)	-6.09
注:运行期为20年。	

由表5可以看出,传统公厕由于使用自来水进行冲厕,产生生活污水,且无资源化等原因造成其ENPV值为负,在经济上不可行;而部分资源型公厕(模式B)因为通过正渗透和反渗透设备既有效地处理了黄水又获得了冲厕的回用水和达标的液态肥,产生了附加的经济效益,因此其ENPV值为正,在经济上可行;完全资源型公厕(模式C)由于需要建设更多的资源化设施,且在采用厌氧消化处理褐水时未能完全统计热量回收所得效益,此外,该模式下公厕可以完全独立使用运行,无需依附电网、给排水管网,在偏远地区推广具有较大的减少基础设施建设投资效益,因此虽然本文中ENPV值为负,但远大于传统公厕(模式A),仍然具有可行性。综上所述,对于已有一定给排水基础设施的地区,可以采用模式B(仅回收尿液中的营养物质),对于偏远的不易建设电网、给排水管网的地区,可以考虑以模式C建设资源化公厕。

3 结语

对以正渗透技术为核心的资源型公厕系统和传统公厕系统进行经济对比分析,并利用净现值法评价了其经济可行性,具体结论如下:

① 资源型公厕系统的固定建设成本较传统厕所系统高,主要是因为相关资源化系统建设,如正渗透和反渗透设备购置,以及太阳能供电系统建设成本高。但随着资源型公厕系统建设和配套设备及产品的规模化、规范化,以及相关技术的进一步升级革新,资源化厕所系统的造价会逐渐降低。

② 采用经济净现值法分析,以正渗透技术为核心的资源型公厕系统的净现值ENPV远大于传统公厕系统,从整个社会角度评价,资源型公厕系统在经济上更具可行性。

③ 经济净现值的分析结果进一步表明,在有

一定污水收集处理基础设施的地区,应优先建设部分资源回收型(仅回收尿液中的营养物质)公厕,既可以有效回收氮磷等资源,又可以达到节水、减排的效果;在缺乏供排水设施的地区,可以建设完全资源回收型公厕,实现资源回收、污染物控制、促进经济增长的目的。

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] Benetto E, Nguyen D, Lohmann T, *et al.* Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment [J]. *Sci Total Environ*, 2009, 407(5): 1506 - 1516.
- [2] Karak T, Bhattacharyya P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2011, 55(4): 400 - 408.
- [3] Etter B, Tilley E, Khadka R, *et al.* Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal [J]. *Water Res*, 2011, 45(2): 852 - 862.
- [4] Ishii S K L, Boyer T H. Life cycle comparison of centralized wastewater treatment and urine source separation with struvite precipitation: Focus on urine nutrient management [J]. *Water Res*, 2015, 79: 88 - 103.
- [5] Chakraborty S, Pal M, Roy M, *et al.* Water treatment in a new flux-enhancing, continuous forward osmosis design: Transport modelling and economic evaluation towards scale up [J]. *Desalination*, 2015, 365: 329 - 342.
- [6] Blandin G, Verliefde A R D, Tang C Y, *et al.* Opportunities to reach economic sustainability in forward osmosis-reverse osmosis hybrids for seawater desalination [J]. *Desalination*, 2015, 363: 26 - 36.
- [7] Gao H, Zhou C, Li F, *et al.* Economic and environmental analysis of five Chinese rural toilet technologies based on the economic input-output life cycle assessment [J]. *J Clean Product*, 2015, 163(S1): 379 - 391.
- [8] 张健, 高世宝, 章菁. 真空便器与真空排水在节水和污水源分离中的应用 [J]. *给水排水*, 2008, 34(2): 96 - 99.

Zhang Jian, Gao Shibao, Zhang Jing. Application of vacuum toilet and vacuum drainage in water saving and sewage source separation [J]. *Water & Wastewater Engine-*

(下转第22页)