

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.010

# 环控生保系统废水处理与回用技术研究和应用进展

程振敏<sup>1,2</sup>, 魏源送<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 水的再生利用是可再生环境控制和生命保障系统(环控生保系统)中最重要的一环。目前的中长期载人航天任务均使用物化原理实现部分水的再生。为了不断完善物质闭合度近乎100%的受控生态生保系统以开展更为长久的载人航天活动,世界各国开展了一系列结合生物技术的废水处理与回用技术研究。对环控生保系统国内外发展历程进行了回顾,并从地面研究和空间实际应用情况两大方面论述了国内外环控生保系统废水处理与回用技术的发展。基于对当前环控生保系统废水处理与回用技术现状的分析,提出了尚待解决的主要问题并对未来环控生保系统水管理系统的发展进行了展望。

**关键词:** 载人航天; 环控生保系统; 受控生态生保系统; 废水处理与回用

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0061-05

## Application and Research Progress of Wastewater Treatment and Reuse Technology in Environmental Control and Life Support System

CHENG Zhen-min<sup>1,2</sup>, WEI Yuan-song<sup>1,2</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Water recycling and reuse is the most important part of the renewable environmental control and life support system (ECLSS). Till now, all the medium- and long-term manned space missions have employed physicochemical technologies to realize partial water reclamation. To develop and improve the controlled ecological life support system (CELSS) with almost 100% material closure that is essential for more long-lasting manned space missions, a series of studies on wastewater treatment and reuse technology combined with biotechnology have been carried out. The development of ECLSS around the world is reviewed, and the development of wastewater treatment and reuse technology for ECLSS is discussed from both aspects of ground research and space application. Based on the analysis of the current status of wastewater treatment and reuse technology for ECLSS, the main problems to be solved are put forward, and the future development of water management system for ECLSS is prospected.

**Key words:** manned space; environmental control and life support system; controlled ecological life support system; wastewater treatment and reuse

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0501405、2016YFE0118500)  
通信作者: 魏源送 E-mail: ysw@rcees.ac.cn

环境控制与生命保障系统(简称环控生保系统)是载人航天器与无人航天器的“分水岭”<sup>[1]</sup>,其基本功能是在密封舱内为航天员创造一个基本的生活条件和适宜的工作环境<sup>[2]</sup>。环控生保系统是一个完全密闭的基本不与外界进行物质交换的环境,并且由于技术、成本等因素,其空间一般较为狭小。应用环境的特殊性,决定了水处理和回用系统需满足如下要求:高标准的产水质量;尽可能高的水回收率;尽可能小的整体体积;尽可能少的副产物(排放气体、生成的浓缩液等)、尽可能少的消耗品和尽可能少的能源消耗。因此,环控生保系统废水处理与回用是一项复杂的系统工程,在其发展过程中始终伴随着挑战。

## 1 环控生保系统国内外发展历程

早期的短期载人航天任务,如前苏联的“东方”号、“上升”号飞船,美国的“水星”号、“双子星”号飞船都采用最为简单的非再生式环控生保系统。对于超过1年以上的载人空间活动,则适合采用再生式环控生保系统。对于长期载人航天(太空远行)及地外星球的居住、生存,由于航程遥远,不可能像近地空间站那样进行补给。如果全部航程的生保用品一次性地从地球上带去,飞行器的起飞质量将庞大得使发射费用无法接受,也就是说前两种生保系统都不能解决问题,必须发展和采用生物再生的密闭式生命保障系统。20世纪70年代末,美国国家航空航天局(NASA)提出受控生态生保系统(CELSS)这一概念,其目的就是要建立起一个由植物、动物(人)、微生物以及一些必要的有机、无机环境构成的物质和能量不断循环并更新的生态平衡系统。CELSS应该能在最小的体积、质量、能耗和劳动量下运行,最大限度地降低来自地球的昂贵的物质再补给需求<sup>[3-4]</sup>。

前苏联/俄罗斯、美国、日本和欧洲等国家和地区在环控生保系统,特别是CELSS的研究方面起步较早,建立了若干地基集成试验系统,比较著名的包括前苏联/俄罗斯的Bios-3综合生命保障模拟系统、欧洲航天局的微生物生态生保系统(MELISSA)、美国的生物圈2号<sup>[5]</sup>以及日本的密闭生态实验装置(CEEF)。与美、俄等国相比,我国在环控生保研究方面起步较晚,基础较为薄弱。但自1992年载人航天工程实施以来,发展迅速,在一系列单元技术的研究方面取得了丰硕成果,并先后开

展了2人7天“人-红萍-鱼”系统集成试验<sup>[6]</sup>、2人30天的“人-植物”系统集成试验<sup>[7]</sup>、“月宫1号”受控生态集成试验<sup>[8]</sup>以及“绿航星际-4人180天受控生态生保系统集成试验”<sup>[9]</sup>等CELSS研究。

## 2 环控生保系统废水处理与回用技术

### 2.1 地面研究

应用物理/化学手段,如蒸发、过滤、离子交换、吸附、膜分离等技术处理废水历时多年,其优点是可控性较强、运行稳定可靠,已在部分CELSS研究中得到了应用。如日本的CEEF使用微滤和反渗透技术处理植物舱废弃培养液并将其重新回用于植物培养,采用反渗透技术处理居住舱废水回用于厕所和动物饲养冲洗。但物理/化学废水处理工艺需要频繁更换部件,耗材以及能耗相对较大的缺点决定了其不适用于长期载人航天探索或地外基地等永久性设施。因此世界各国在发展CELSS的过程中,开展了结合生物技术的废水处理与回用技术研究。

#### ① 湿地等简单处理

在Bios-3中,人类废弃物基本没有参与物质循环,直到最后一次试验,尿液被直接加入到小麦培养液中进行净化,同时达到了回收尿液中氮素的目的。总面积巨大的生物圈2号采用了“厌氧储箱—人工湿地”两级污水处理系统。厌氧储箱内的废水达到储存时间(人产生的废水停留时间约4d,其他废水长达2~3周)后排入2块总面积为41.1m<sup>2</sup>的人工湿地。在人工湿地内停留约4d后,处理水进入植物区作为灌溉用水进行回用。1991年—1993年,系统共处理了约750m<sup>3</sup>的废水,BOD<sub>5</sub>从厌氧储箱中的123mg/L降低至人工湿地出水的25mg/L。人工湿地内的溶解氧浓度较低,约为1mg/L,因此废水中的氨氮直到湿地出水进入灌溉水储罐中才被氧化为硝酸盐氮。

尿液中含有大量有机物,同时在很短时间内会滋生大量细菌,因此直接进行尿液回用是不适宜的。人工湿地利用了土壤、微生物和植物的共同作用对废水进行净化,在负荷较低的情况下处理效果较好,但其巨大的占地面积是其应用于CELSS的一大难点,另一方面,湿地植物的不可食部分也会增加CELSS系统内固体废弃物处理的负担。

#### ② 生物膜类工艺

MELISSA示范项目采用容积为8L的填充床反应器,通过在反应器内填料上接种特定微生物形成

生物膜,在完全硝化状态下最大氨氮转化能力可以达到  $1.35 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。Majda 等<sup>[10]</sup>在 NASA 的资助下开发了针对空间站和载人飞船产生的灰水(按生化需氧量和氨氮分别高于 500 和 250 mg/L 考虑)的固定化细胞填充床反应器(ICPB)。整个反应器主要包括一个全饱和压力填充床和一个加氧膜组件。膜组件中填充多孔疏水性氧气选择透过性膜,废水通过压力系统在填充床和膜组件之间循环,经过膜组件时,透过膜的氧在无泡状态下溶入废水,填充床填料上附着的微生物通过生命活动对废水中的污染物进行降解及转化。在加压模式下,整个系统可以适应无重力环境。1 年的连续运行数据表明,在常压(不使用加氧膜组件)和加压两种模式下,系统对化学需氧量的去除率均高于 90%;在添加大理石条作为碱度补充源的情况下,常压和加压两种模式下的硝化率从 50% 分别提高到 80% 和 60%,系统内未发现亚硝酸盐积累<sup>[10]</sup>。

近年来,NASA 开始研发膜曝气生物膜反应器(MABR)<sup>[11]</sup>。与固定化细胞填充床反应器(加压运行模式)相比,MABR 结构更为简单,反应器内的膜既是氧气扩散组件,又是微生物附着生长的载体,实现了装置一体化。在完成迅速启动和污染物负荷研究<sup>[11]</sup>之后,NASA 又在 MABR 后增加“正渗透-反渗透膜系统”,以进一步去除 MABR 出水中的残余有机物和无机盐类。由于试验废水的碳氮比较低(约 0.55:1),MABR 对进水中有机碳和氨氮的去除率只有 83.6% 和 55.6%。整个系统回收了废水中超过 90% 的水分,而与现有国际空间站的废水处理工艺相比,却能节省 20% 以上的消耗品<sup>[12]</sup>。

生物膜法单位体积生物量高,反应器体积小,处理效率高。但目前的相关研究中,还存在着诸如营养物回收率偏低以及消耗品用量偏高(MABR-正渗透-反渗透膜系统产出 1 L 净水仍需 15 g 以上的盐和酸<sup>[12]</sup>)的问题。待进一步优化后,基于生物膜法的处理工艺有望应用于将来的 CELSS。

### ③ 膜生物反应器

中国航天员科研训练中心艾为党等<sup>[13]</sup>研制了空间废水处理膜生物反应器,对模拟空间站废水进行了处理,在 pH 值为 6.5~7.5、温度为 24~26℃、水力停留时间为 20 h、碳氮比为 0.81 的条件下,实现了近 90% 的化学需氧量和生化需氧量去除率。“月宫 1 号”使用“膜-生物活性炭反应器-超滤”

工艺处理卫生和厨房废水,产水经紫外消毒后作为植物培养液的补充水。经处理,卫生和厨房废水化学需氧量从  $(557.85 \pm 128.33) \text{ mg/L}$  降至  $(82.10 \pm 41.81) \text{ mg/L}$ ,去除率达到 85.3%,同时废水中绝大部分的氮和磷被保留,有利于补充植物培养液的营养元素<sup>[14]</sup>。“绿航星际-4 人 180 天受控生态生保系统集成试验”装配了以“厌氧膜生物反应器-好氧膜生物反应器(AnMBR-MBR)”为主体工艺的废水处理与回用系统,对系统内乘员产生的尿液和生活废水进行混合处理,回收净水和氮、磷养分用于补充植物营养液。4 人 180 天试验期间,植物营养液实现内部自循环且水质稳定,TOC 为 20~30 mg/L,氨氮低于 1 mg/L<sup>[15]</sup>。物质流分析结果表明,AnMBR-MBR 系统处理地基 CELSS 废水时,其单位产水的物质消耗量远低于采用物理化学原理的废水处理系统,有利于提升 CELSS 物质流闭合度、降低其外部物资补给需求。

膜生物反应器同样具有单位体积生物量高的特点,且因膜的精细过滤,出水水质一般优于活性污泥法和生物膜法,也有望应用于 CELSS。但膜生物反应器也尚存在一些需要改善的方面,比如需要优化工艺控制参数降低膜污染速率,以减少装置维护频率并降低系统消耗品需求。同时,提升微重力下氧的传质效率也是其需要面对的问题。

## 2.2 空间实际应用进展

### ① 前苏联/俄罗斯

1975 年,采用吸附/催化技术作为核心净化单元的冷凝水回收系统(SWR-C)装配到“礼炮-4”空间站,为乘员提供饮用水、饮食制作用水和淋浴用热水,处理能力为 18 kg/d,水回收率 100%,比质量(再生单位质量净水消耗物质质量)为 0.18 kg/kg,远小于 1.2 kg/kg 的地面补给比质量。在“礼炮-4”之后,SWR-C 还被装配在“礼炮-6”“礼炮-7”空间站及之后的和平号空间站上。自 1986 年开始,SWR-C 在和平号空间站上运行了 13 年,共回收约 14 000 kg 水。为进一步提高水回收率,和平号空间站上在 SWR-C 之外又装备了尿液水回收系统(SWR-U)。SWR-U 主要包括尿液供给、分离、化学预处理、常压膜蒸馏和吸附/催化(浓缩液)等单元<sup>[16]</sup>。在和平号空间站运行期间,SWR-U 共回收了 6 000 kg 水,实现了 80% 的水回收率<sup>[16]</sup>。国际空间站上俄罗斯舱段中的冷凝水处理系统与和平号



空间站中的系统非常相似,只是在水气混合管路上增加了一个装有催化剂的过滤反应器,用于在空间站的环境温度和压力下去除有机污染物。在和平号空间站 SWR-U 的基础上,升级的尿液回收系统使用了包括多级旋转减压蒸发器和减压蒸发系统,其水回收率由 SWR-U 的 80% 提高到 90%<sup>[16]</sup>。

## ② 美国

与俄罗斯针对各种废水分别采用单独处理装置的策略不同,美国在国际空间站上的废水处理与回用策略为:采用尿液处理装置(蒸汽压缩蒸馏装置)对尿液进行处理,蒸馏液进入废水处理系统中与温湿度系统冷凝水统一进行处理,合格出水作为乘员饮用水和电解制氧用水。该尿液处理装置设计水回收率为 85%,于 2008 年 11 月 20 日初次启动,截止到 2018 年 5 月 10 日,共产出 16 179 L 蒸馏液<sup>[17]</sup>。2009 年,由于硫酸钙沉淀的生成和积累(尿液预处理试剂中含有硫酸),蒸发装置出现故障,尿液处理装置的水回收率不得不下调至 70%。之后,宇航员们被要求增加饮水量以改善健康状况并降低尿液中钙的比例。之后两年的数据监测表明,尿液中降低的钙浓度可以实现尿液处理装置 74%~75% 的水回收率。自 2014 年起,尿液处理装置的水回收率设定为 75%。为了使尿液处理装置的水回收率重新升至设计标准,NASA 已完成使用磷酸代替硫酸作为尿液预处理试剂的试验,2016 年起,美国舱段启用磷酸预处理,尿液处理装置水回收率恢复到 85%。废水处理系统于 2008 年 11 月 22 日初次启动,也采用物化处理技术,主要由旋转气体分离器、颗粒物过滤器、多介质过滤床以及催化氧化反应器等构成。截止到 2018 年 5 月 6 日,共产出约 34 680 kg 出水<sup>[17]</sup>。

## 3 结语

近几十年的研究和实践表明,人类在近地轨道空间的载人航天技术已经相对成熟,其典型成果便是历史上的和平号空间站、已进入服役末期的国际空间站以及正在建造中的中国空间站。载人航天的下一步目标必然是长期星际航行(如飞往火星的载人飞船)以及地外基地(如月球、火星基地)的建设。要实现这一目标,必须发展完善 CELSS,特别是废水处理和回用技术。基于生化原理的废水处理技术,从最初的直接利用植物净化尿液等废水,已发展到 ICPB、MABR 和膜生物反应器等较为先进的工艺,相

关研究已证实这些生物处理工艺具有良好的污染物去除能力和氮磷等营养元素保留能力,同时,相比物化技术,其消耗品使用量大为降低,这非常有利于其在 CELSS 中的应用。然而,现阶段的研究也发现了一些问题:①若尿液单独处理,不适宜采用生化手段,难以从其中充分回收氮、磷等营养元素,并且会产生浓缩废液;②若尿液与生活废水等其他废水合并处理,废水碳氮比偏低、碱度不足,造成生化系统对有机碳的去除率和氨氮的转化率偏低,同时存在盐分在系统内累积的问题;③废水处理过程的消耗品有待于进一步降低;④应用于空间站的水处理技术均为物化技术,生化工艺相关关键技术有待于在轨验证。

按照各航天大国的目标以及目前 CELSS 相关研究发展态势,可以预见,随着对 CELSS 认识的深入,未来的水管理系统的功能定位,将从污染物的去除发展为净水与营养物质(氮和磷)甚至生物质的生产,其在 CELSS 中发挥的作用必将得到强化。我国在地基 CELSS 研究方面已经获得大量宝贵数据,取得了一定的成果。不久的将来,国际空间站将退役,我国正在建造的空间站将成为未来一段时间内唯一的在轨空间站,这对于我国发展载人航天事业、进行 CELSS 相关技术的在轨验证十分有利,我国有望率先实现 CELSS 相关技术的空间应用。

## 参考文献:

- [1] 汤兰祥,高峰,邓一兵,等. 中国载人航天器环境控制与生命保障技术研究[J]. 航天医学与医学工程, 2008,21(3):167-174.  
Tang Lanxiang, Gao Feng, Deng Yibing, et al. Research on environmental control and life support system (ECLSS) of China's manned spacecraft[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2008, 21(3): 167-174(in Chinese).
- [2] 沈学夫,付岚,邓一兵. 飞船环境控制与生命保障系统[J]. 航天医学与医学工程, 2003,16(增刊):543-549.  
Shen Xuefu, Fu Lan, Deng Yibing. Environmental control and life support system of spacecraft[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2003, 16(S1): 543-549(in Chinese).
- [3] 郭双生,董文平,杨成佳. 空间受控生态生保技术发展现状与展望[J]. 航天医学与医学工程, 2013, 26

- (3):259-264.
- Guo Shuangsheng, Dong Wenping, Yang Chengjia. Current status and prospect in controlled ecological life support technique development[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2013, 26(3): 259-264 (in Chinese).
- [4] 王康,高峰. 载人航天器环控生保系统50年研制回顾与展望[J]. 航天医学与医学工程, 2011, 24(6): 435-443.
- Wang Kang, Gao Feng. Review and prospects of fifty years' development of environment control and life support system in manned spacecraft [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2011, 24(6): 435-443 (in Chinese).
- [5] Nelson M, Gray K, Allen J P. Group dynamics challenges: Insights from Biosphere 2 experiments[J]. Life Sci Space Res, 2015, 6(7): 79-86.
- [6] Chen M, Deng S F, Yang Y Q, *et al.* Efficacy of oxygen-supplying capacity of Azolla in a controlled life support system[J]. Adv Space Res, 2012, 49(3): 487-492.
- [7] 郭双生,吴志强,高峰,等. 中国受控生态生保技术研究进展与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 269-280.
- Guo Shuangsheng, Wu Zhiqiang, Gao Feng, *et al.* Progress and prospect of controlled ecological life support technology in China[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(3): 269-280 (in Chinese).
- [8] Fu Y M, Li L Y, Xie B Z, *et al.* How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the Moon or Mars[J]. Astrobiology, 2016, 16(12): 925-936.
- [9] 李莹辉,左永亮. “绿航星际”—4人180天受控生态生保系统集成试验圆满收官[J]. 国际太空, 2017(1): 14-18.
- Li Yinghui, Zuo Yongliang. China ended 4 volunteers 180-day controlled ecological life support system experiment successfully[J]. Space International, 2017(1): 14-18 (in Chinese).
- [10] Majda N R, Christos C, George P K. Development of a gravity-independent wastewater bioprocessor for advanced life support in space[J]. Water Environ Res, 2005, 77(2): 138-145.
- [11] Meyer C E, Pensinger S, Pickering K D, *et al.* Rapid start-up and loading of an attached growth, simultaneous nitrification/denitrification membrane aerated bioreactor [A]. The Proceedings of the 45th International Conference on Environmental Systems[C]. Washington: ICES, 2015.
- [12] Meyer C E, Pensinger S, Adam N, *et al.* Results of the alternative water process test, a novel technology for exploration wastewater remediation [A]. The Proceedings of the 46th International Conference on Environmental Systems[C]. Austria: ICES, 2016.
- [13] 艾为党,郭双生,秦利锋,等. 微生物处理空间模拟废水工艺初探[J]. 航天医学与医学工程, 2013, 26(3): 254-258.
- Ai Weidang, Guo Shuangsheng, Qin Lifeng, *et al.* Study on technique of simulated space wastewater treatment by microorganisms [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2013, 26(3): 254-258 (in Chinese).
- [14] Xie B Z, Zhu G R, Liu B J, *et al.* The water treatment and recycling in 105-day bioregenerative life support experiment in the Lunar Palace 1 [J]. Acta Astronautica, 2017, 140(S): 420-426.
- [15] Zhang L C, Li T, Ai W D, *et al.* Water management in a controlled ecological life support system during a 4-person-180-day integrated experiment: Configuration and performance[J]. Sci Total Environ, 2019, 651: 2080-2086.
- [16] Grigoriev A I, Sinyak Y E, Samsonov N M, *et al.* Regeneration of water at space stations [J]. Acta Astronautica, 2011, 68(9/10): 1567-1573.
- [17] Carter L, Williamson J, Brown C A, *et al.* Status of ISS water management and recovery [A]. The Proceedings of the 48th International Conference on Environmental Systems[C]. New Mexico: ICES, 2018.



作者简介:程振敏(1982-),男,河北唐山人,博士,工程师,从事水处理研发工作。

E-mail: chengzhenmin@126.com

收稿日期:2019-11-18