

载人深空探测活动中的尿液处理回收技术分析

朱国荣, 谢倍珍, 刘红

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院环境生物学与生命保障技术研究所, 北京 100083)

摘要: 生物再生生命保障系统 (Bioregenerative Life Support System, BLSS) 是人类进行深空探测活动, 实现长期载人空间飞行必需的关键技术, 对于太空的探索开发具有重要意义。在BLSS系统内, 航天员尿液废水的处理回收是非常重要的部分。将尿液中所含有的大量的水分和丰富的营养物质回收用于系统内植物生长所需营养液的配制, 既可以保证植物的正常生长, 也有助于实现系统内物质的循环利用进而提高BLSS的闭合度。尿液中所含的大量盐分会威胁植物生长, 所以需通过一定的技术手段处理尿液废水并回收其中的水分和营养。为了探索适用于BLSS中的尿液处理回收技术, 首先分析了面向空间站应用的尿液处理技术, 如蒸馏技术等; 然后基于回收营养物质的需求, 分析了面向民用的、发展较为成熟的尿液处理回收技术, 如离子交换吸附技术、氨气吹脱技术和鸟粪石沉淀技术, 并讨论了这些尿液处理回收技术在BLSS中的应用前景。最后基于BLSS的实际需求, 提出了有望用于BLSS中的尿液处理回收技术流程。

关键词: 生物再生生命保障系统; 尿液; 水分; 营养物质; 回收

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)06-0582-09

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2018.06.012

引用格式: 朱国荣, 谢倍珍, 刘红. 载人深空探测活动中的尿液处理回收技术分析[J]. 深空探测学报, 2018, 5(6): 582-590.

Reference format: ZHU G R, XIE B Z, LIU H. Analysis of urine treatment and recovery technology used in manned deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 582-590.

引言

随着人类深空探测活动的不断发展, 载人航天逐渐朝着星际航行或未来星球基地的建设方向发展, 而目前近地轨道的短期飞行任务所依赖的供给式生命保障系统因为耗资巨大并不适合未来更加遥远的飞行任务。相比于供给式生命保障系统, 长期运行费用相对较低的再生式生命保障系统(尽管其初期研发建设费用较高), 更适用于未来任务周期较长的载人深空探测活动^[1]。

生物再生生命保障系统 (Bioregenerative Life Support System, BLSS) 作为再生式生命保障系统的一种, 是基于生态系统原理将生物技术与工程控制技术有机结合, 由植物、动物和微生物组成的人工生态系统; 其中的氧气、水和其他营养物质可经过一系列措施在系统内循环再生, 从而极大地减少长期空间活动所需的地面补给, 为航天员提供更为舒适安全的生存环境^[2-5]。

BLSS从功能结构上可分为两部分, 一部分是以高等植物为代表的自养单元; 另一部分是以人为代表的异养单元, 高等植物是BLSS中最主要的功能部件, 也

是有别于其他类型生命保障系统的重要标志^[6]。高等植物具有吸收二氧化碳、产水制氧、提供食物、调节航天员心情等的功能, 所以为植物提供充足的水分和营养物质以保证其在数量和质量上的稳定对于BLSS具有重要意义。而航天员尿液废水中含有高达95%的水分, 3.5%的有机物(包括尿素, 肌酐和尿酸等)和1.5%的无机盐(钠、钾、氯、镁、钙、铵、硫酸盐和磷酸盐等)^[7]。因此, 可将尿液中的水分和营养物质回收用于植物生长所需营养液的配制, 既可以保证植物的正常生长, 也有助于实现系统内物质的循环利用进而提高BLSS的闭合度。

本文首先分析了目前面向空间站应用的尿液处理回收技术, 如蒸馏技术和冻干技术等, 这些技术都可以有效地回收水分, 而不能有效地回收尿液中的营养物质。在此基础上, 分析了目前研究较为成熟的, 面向民用的尿液处理回收技术及其应用于BLSS的前景, 如离子交换技术、氨气吹脱吸收技术和鸟粪石沉淀技术。最后, 基于BLSS的实际需求提出了有望用于BLSS内的尿液处理回收技术流程, 以期为相关研究提供参考。

收稿日期: 2018-03-28 修回日期: 2018-04-20

基金项目: 载人航天计划预研资助项目 (020302)

1 面向空间站应用的尿液处理回收技术

1.1 应用于空间站的尿液处理回收技术

尿液的处理回收是载人航天生命保障系统中非常重要的一环,美俄等航天大国都投入了大量的人力物力进行了系统的研究,攻克了许多科学技术难题并积累了丰富的经验。

空间站中尿液的处理通常包括预处理、物质回收和后处理。预处理主要完成尿液的收集,预处理剂的添加以及气液相的分离;预处理剂的添加主要是为了避免尿液中尿素水解释放出的氨气引起空气污染,所以在空间站处理回收尿液之前,都添加了化学药剂预处理尿液以防止尿素水解^[8],如国际空间站美国舱段采用强酸和铬氧化物作为尿液预处理剂^[9]，“和平号”空间站使用防腐剂作为预处理剂^[10]。后处理主要用于进一步净化从尿液中回收的水分,使其达到饮用水标准。本文主要分析空间站中用于物质回收阶段的技术,如国际空间站美国舱段采用蒸汽压缩蒸馏技术,“和平号”空间站采用膜蒸馏技术。

1) 蒸汽压缩蒸馏技术

国际空间站美国舱段所采用的尿液处理技术为蒸汽压缩蒸馏技术。在其工作过程中,尿液废水先在蒸发室内实现减压蒸发,经气液分离后的气体在输送到冷凝室的过程中受到罗茨压缩机的作用,饱和温度升高,到达冷凝室后凝结在蒸发室和冷凝室共用的金属壁上,冷凝潜热可加热蒸发室内的尿液废水促使其蒸发^[11-13]。蒸汽压缩蒸馏技术主要利用相变潜热降低整机的运行能耗,整个过程所消耗的能量主要用于罗茨压缩机的工作以及补偿系统的热力和机械损失^[14]。尿液的冷凝出水会与空气冷凝水以及卫生废水一起进入水处理装置,依次通过多级过滤床、催化反应器和离子交换床进一步处理后达到饮用水标准;而尿液中的无机盐和有机物则以浓缩卤水的形式排入循环箱过滤器装置,之后通过航天飞机运回地面^[15-18]。

2) 膜蒸馏技术

“和平号”空间站采用膜蒸馏法处理回收尿液。膜蒸馏是膜技术与蒸发过程相结合的分选过程,主要通过疏水微孔膜将溶液中的挥发性溶剂与非挥发性溶质分离。膜的一侧与受热的待处理溶液接触,受热挥发的水分子能够通过膜微孔进入膜的另一侧而被收集,非挥发性物质则被截留在待处理溶液中,从而实现水分的回收^[19-20]。“和平号”空间站上的膜蒸馏模块主要由尿液循环回路和空气循环回路构成,经预处理的尿液进入膜蒸发器后,在电加热器的加热下,尿液中的水分在膜一侧表面升温蒸发通过膜的疏水性毛细孔进入

另一侧的空气循环回路。剩余的尿液继续在尿液循环回路里蒸发浓缩,空气循环回路里的水分经冷凝后进入以吸附催化为主的后处理单元得到进一步净化后用于电解制氧^[10, 21-23]。

1.2 面向空间站应用研究的尿液处理回收技术

除了已在空间站上实际使用的方法,许多研究人员还在地面上进行了其他面向空间站应用的尿液处理回收技术的研究,如冻干技术、冷冻浓缩技术和生物技术等。

1) 冻干技术

冻干技术又称冷冻干燥技术,首先在低温条件下冷冻水溶液使水转变为冰,然后在真空条件下将水分直接由固态冰升华为水蒸气,并通过冷凝器收集水蒸气,从而实现溶质和水分的分离。Holland等^[24]基于宇宙空间天然的真空环境和巨大冷量,提出使用冻干法处理空间站的尿液。首先将尿液样品在液氮或干冰和乙醇混合物中冷冻,再通过冻干器在19℃, 0~2 Pa的条件下冻干尿样14~24 h,并通过-55℃的冷凝板(冷凝板覆有保鲜膜以防止污染物浸入回收水中)富集升华的水蒸气,所得的回收水清澈无异味,与普通自来水几乎没有区别。该方法可实现97%的水分回收率,且对总固体、总悬浮性固体、总溶解性固体、总挥发性固体及总固定性固体等的去除率均在99%以上;但其处理效率易受真空度、环境温度和样品表面积等因素制约,所以还需进一步优化研究。

2) 冷冻浓缩-反渗透技术

于涛等^[25]基于宇宙空间的巨大冷量,提出利用冷冻浓缩与反渗透的联合工艺处理回收空间站中的尿液。冷冻浓缩法是利用水分子在低温下首先形成冰晶体,而其他营养物质仍然呈液相的原理实现溶质和水分的分离;反渗透技术则是利用反渗透膜实现水分和杂质的分离。作者所提出的联合工艺在微重力下的实现过程为:①首先尿液和冲洗水经尿收集器和气液分离器后以单相流进入储液罐,并按一定的比例分别加入浓硫酸和次氯酸钠进行预处理;②尿液进入不锈钢冷冻罐,在低温条件下,其水分将杂质排斥在外而首先以冰晶的形式析出;③冷凝所得冰晶在换热器内融化后测定融冰的电导率和总有机碳(Total Organic Carbon, TOC),若不满足要求(电导率<1 000 μs/cm, TOC<10 mg/L)则返回继续进行冷冻浓缩处理,若满足要求则进入反渗透装置进行深度处理。实验结果表明,仅单级冷冻浓缩就对尿液中各种杂质有良好的去除效果,反渗透膜对各级融冰中盐分的去除率均大于96%,对氨氮的去除率均大于92%,对有机物的去除效率则

低于65%。也有相关研究表明,反渗透膜容易被大分子物质、颗粒物和微生物堵塞,后期清洗维护比较复杂^[16],因此可采用多级冷冻浓缩降低融冰中的TOC,并防止有机物污染反渗透膜。实验中采用三级冷冻浓缩——反渗透联合处理工艺出水的pH值为6~8,电导率 $<15\ \mu\text{s}/\text{cm}$, $\text{TOC}<5\ \text{mg}/\text{L}$,水份回收率可达97.75%,说明该联合工艺具有较高的可行性。但还需经过长期地面试验进一步验证其实际应用的可靠性。

3) 生物技术

Liu等^[26]为了解决空间站的供水问题,提出采用生物(绿藻)吸收与光催化氧化(UV-TiO₂)的综合方法处理尿液以减少从地球补给的水量。综合处理净化装置由3部分组成,分别为多层绿藻种植盘、吸收过滤柱以及光催化氧化反应器。尿液首先进入多层绿藻种植盘,绿藻可将其中的营养物质吸收、分解、代谢和净化;经过生物净化的尿液进入过滤柱,其中的多孔填料可将尿液中的悬浮固体、难闻气味和色度有效去除;最后进入由紫外灯和TiO₂催化氧化床构成的光催化氧化反应器,反应器内产生的自由基($\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{O}_2$)能将尿液中的有机杂质分解,最终出水水质能够达到国家饮用水水质标准(GB5749-1985)。采用生物技术处理尿液废水具有能耗低且处理效果好的优点,但其所需的反应条件较为严格且处理时间较长,而且生物吸收也会造成营养物质的损失。

目前面向空间站应用的尿液处理回收技术,如蒸馏技术、冻干技术、冷冻浓缩-反渗透技术和生物技术都集中于回收尿液中的水分,而不能有效地回收尿液中的营养物质。但在BLSS内,回收尿液中的营养物质意义重大,所以需分析讨论面向民用的尿液处理回收方法,以期借鉴适宜的方法将其用于BLSS内回收尿液的营养物质。

2 面向民用的尿液中营养物质的处理回收技术

现有的面向空间站应用的尿液处理回收技术并不能有效回收尿液中的营养物质,所以还需研究其他可以有效地从尿液中回收营养物质的方法。基于此,本文分析讨论了目前几种面向民用的、发展较为成熟的从尿液中回收营养物质的方法,为研究开发出适用于BLSS内的尿液营养物质回收技术流程提供新的思路。由于尿液中的营养物质种类繁多,本文主要基于氮、磷和钾这3种含量较高的营养物质的回收效果讨论分析各技术并分析其应用于BLSS中的可行性。

尿液中氮素的85%以尿素的形式存在^[27],在土壤

环境中,大部分尿素氮由微生物转化为NH₄⁺-N和NO₃⁻-N后被植物根系吸收利用,少部分则以尿素的形式被植物直接吸收利用^[28]。而在BLSS中,植物根系的微生物不如土壤中丰富,所以需通过预处理将尿液中的尿素水解为植物可有效吸收利用的无机氮,然后再将其回收用于植物营养液的配制。

2.1 尿液的预处理技术

自然条件下,尿液中尿素的水解速率比较慢,所以需通过加热或添加脲酶的方法加速尿素的水解。尿液的预处理主要有以下几种方法

1) 热力水解法

尿素水解反应是一个吸热过程,当温度超过100 °C时,水解速率会明显加快^[29-30],热力水解法就是利用水蒸汽在高温高压条件下(200 °C, 2 MPa)将尿素水解,此反应过程需在耐压耐热材料制作的装置中进行,并且为了保证尿素的充分反应,需在反应体系中加入过量的水,但会造成水蒸气的大量浪费^[31],过量水所消耗的汽化潜热也会造成一定的能量损失,加大整个反应过程的动力消耗和成本。该技术目前主要用于火电厂烟气脱硝中制氨,因其反应条件较为剧烈,因此并不适用于BLSS。

也有研究人员通过添加金属氧化物作为催化剂加快尿素的水解,如李美娜等^[32]制备固体碱镁铝滑石(MgAl-LDH)作为催化剂催化水解废水中的尿素,在水解温度为165 °C,水解时间为120 min时,取得了较高的尿素水解效率;但该方法也存在催化剂制备复杂,反应温度较高的问题。

2) 脲酶水解法

脲酶是催化尿素水解的专一性水解酶,能在常温常压条件下催化尿素快速水解为氨和二氧化碳。脲酶催化尿素的水解速率是尿素在水溶液中自身水解速率的10⁴倍^[33-34],Wuang等^[35]的研究也表明人工添加脲酶后的尿素分解率从自然分解率的0.91%/d升高至了85%/d。在实际应用中,脲酶水解尿素一般有两种操作方法,分别是游离酶-膜分离法和固定化脲酶法。游离酶-膜分离法存在游离脲酶易失活、难以重复利用、易损失的问题,所以通常采用更为稳定的固定化脲酶法^[36]。

固定化脲酶法是通过物理或化学手段将游离酶固定于不溶性的载体材料所限定的空间区域内并保持其催化活性,连续反应后的固定化脲酶仍可以回收并重复利用^[37]。关于固定化脲酶的应用研究已经非常成熟,如用于处理含有尿素的农业废水或尿素生产厂出水,制作监测尿素的生物传感器等^[38-39]。马歇尔空间飞行中心曾测试使用脲酶生物反应器催化水解尿液中

的尿素^[40], Deng等^[41]的实验结果也表明, 固定化脲酶法相比于高温酸化法, 能在较温和的反应条件下, 实现更高的尿素水解效率, 更适合作为BLSS中尿液的预处理方法。所以可设计合适的反应器, 将固定化脲酶法用于预处理BLSS内的尿液废水。

2.2 营养物质的回收技术

将尿液中的尿素转换为氨氮后, 就需通过一定的技术手段回收尿液中的营养物质。本文主要分析讨论了目前应用较为成熟的离子交换技术、氨气吹脱技术、鸟粪石沉淀技术对氮、磷、钾的回收效果以及其在BLSS中的适用性。

1) 离子交换吸附技术

离子交换吸附技术是借助于不溶性离子交换剂上的可用来交换的离子与溶液中同性离子交换的反应, 以达到提取或去除溶液中某些离子的目的^[42]。

研究人员已将其应用于尿液中营养物质的回收, 如Beler-Baykal等^[43]利用对铵根离子有较高亲和力的斜发沸石从源分离尿液中回收了86%的铵根离子, 并将其作为缓释肥应用于印度橡胶树的种植, 初步试验结果表明吸附了铵根离子的斜发沸石能够用于植物培植。Kocatürk等^[44]利用斜发沸石从未经稀释的尿液中分别回收了86%的氨氮和96%的正磷酸盐, 并通过盆栽试验证明负载了营养元素的斜发沸石与商业化学肥料一样有效。Boyer等^[45]采用具有高磷酸盐选择性的含氧化铁(III)颗粒聚合物配体交换树脂(Polymeric Ligand Exchange, PLE)从新鲜尿液和水解尿液中分别吸收了98%和87%的磷酸盐, 证明了离子交换过程可以实现对尿液废水中营养物质的高选择性回收。也有研究人员指出, 阳离子交换吸附技术也能用于钾元素的回收^[46], 但在Kocatürk等^[44]的研究中, 钾元素能够被斜发沸石从尿液中吸附, 但未能有效从斜发沸石上解吸回收, 具体原因还有待探究。

尽管吸收了营养物质的离子交换剂能够作为缓释剂为植物提供营养物质, 但在BLSS中, 不同植物生长所需的营养液需要精确配制, 所以从尿液中吸附了营养物质的离子交换剂并不能直接为植物提供营养物质, 还需从离子交换剂上解吸营养物质到回收液中, 然后通过离子色谱仪测定回收液中营养物质的含量。实际所需的操作和设备会比较繁琐, 有可能加重乘员的工作负担, 并不推荐将其用于BLSS中。

2) 氨气吹脱吸收技术

氨气吹脱吸收技术是将废水调至碱性, 使水中的铵根离子转化为游离氨后, 将气体通入水中, 使水中溶解的游离氨穿过气液界面向气相转移, 气体携带氨

气进入酸液吸收桶以达到回收氮素的目的, 常用空气作载体。Başakçıldan-Kabakci等^[47]为了解决尿液中氨不稳定的问题, 在尿液的pH为12、空气流通速率为 $0.21 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下, 应用氨气吹脱吸收技术从尿液中回收氨, 最终以硫酸铵的形式从尿液中回收了97%的氨氮。还可以通过提高空气的流通速率和温度增加氨的传质系数进而提高回收效率^[48]。氨气吹脱技术主要是利用定向流动的气体携带氨气进入吸收液, 进而实现氨氮与尿液废水的分离; 而在微重力环境中, 乘员尿液通常以气液混合的形式收集, 在正式处理回收尿液废水前通常需通过气液分离器将混合相分离为气相和液相。所以可在装置严格密封的情况下, 考虑将氨气吹脱吸收与气液分离相结合用于BLSS内氨氮的回收。

3) 鸟粪石沉淀技术

鸟粪石沉淀技术是一种常用的从尿液中回收氮、磷、钾的技术, 一般有两种形式: $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。当以 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的形式结晶沉淀时, 可以从尿液中回收氮和磷; 当以 $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (钾型鸟粪石)的形式结晶沉淀时, 可以从尿液中回收磷和钾, 而由于尿液中各种离子浓度相差较大, 所以通常需额外添加适量的镁源(如 MgO 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 MgCl_2)以促进鸟粪石的沉淀。鸟粪石沉淀技术一般情况均指生成 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的沉淀技术, 其沉淀生成的最佳pH范围为7.0~9.0, 最佳的镁磷比为1.3:1^[49]。由于尿液中氮、磷的含量差距较大, 鸟粪石沉淀技术在回收大部分磷的同时只能回收10%~20%的氮素^[50], Etter B.等^[51]在尼泊尔Siddhipur村建立了一个符合当地要求的低成本鸟粪石反应器, 该反应器以低镁剂量(1.1 mol Mg/mol P)在1 h内回收了90%以上的磷和小部分氨。为解决氨氮回收率低的问题, 可综合应用鸟粪石沉淀技术和氨氮回收技术。Samantha Antonini等^[52]在越南芹苴大学某宿舍楼单独建立了一套尿液收集系统, 并使用氨气吹脱吸收技术和鸟粪石沉淀技术的综合工艺从源分离尿液中回收营养物质, 结果表明: 50 L源分离尿液在经过一个处理周期后可产生约110 g鸟粪石(磷回收率为98%), 当汽提塔以80 L/h的速度循环尿液3 h后, 可将90%以上的氨氮从尿液中分离出来, 并以液体硫酸铵的形式全部回收。

也有研究人员采用钾型鸟粪石沉淀技术从尿液中回收磷和钾, 如Gao等^[53]利用钾型鸟粪石沉淀技术从合成尿液中同时回收磷和钾, 实验结果表明: 过量的镁不利于沉淀生成, 而同时过量的镁和磷酸盐可显著提高结晶效率; 钾型鸟粪石结晶的最适pH为11, 而在此pH下, 尿液中的铵根离子、钙离子和钠离子会显著阻碍其结晶效率, 其中铵根离子的影响最大。Xu等^[54]在

pH为8.5~11.5, Mg:P为0.6~1.4的条件下,以钾型鸟粪石沉淀的形式从尿液中分别回收了99%的磷和33%的钾,同时提出应该提前回收氨氮以减少铵根离子与钾离子的竞争,进而提高钾的回收率。所以为了从尿液中回收更多的营养物质,可先从尿液中回收氨氮,再采用钾型鸟粪石沉淀技术中进一步回收磷和钾。

Gonrot等^[55]结合应用沸石吸附技术和鸟粪石沉淀技术从尿液中回收了64%~80%的氮和100%的磷用于农田作物种植,并通过小麦和大麦的短期气候实验室证明从尿液中回收了营养物质的沸石-鸟粪石矿物混合物作为植物营养源完全可以与商业缓释肥相比。Lind等^[56]应用斜发沸石吸附和鸟粪石沉淀结合的方法从尿液中回收了大部分磷和钾,以及65%~80%的氮,固体混合物也被证明具有良好的营养品质可作为土壤改良剂。

基于以上分析,可以将氨氮吹脱吸收技术与鸟粪石沉淀技术结合应用于BLSS中,回收尿液中的氮、磷和钾以供植物生长。在一定范围内,鸟粪石在水中的溶解度随着pH的升高而降低,而当pH升高到一定值时,鸟粪石的溶解度会随着pH的升高而增大^[57];所以可将生成的鸟粪石沉淀溶解用于植物营养液的配制。虽然已有研究表明,鸟粪石可以作为缓释肥为植物的生长提供营养,但在BLSS中,植物所需的营养液均为定量精确配制,直接使用鸟粪石为植物提供营养物质不易控制其营养物质的量,所以需将鸟粪石溶解后测定其中营养物质的含量,然后配制植物生长所需的营养液。

3 面向BLSS应用的尿液处理回收技术

3.1 应用于BLSS中的尿液处理回收技术

为了有效利用尿液中的水分和营养物质,前苏联的BIOS-3 (Biosphere-3)和欧洲的微型生态生命支持系统(Micro-Ecological Life Support System Alternative, MELISSA)系统都采用了植物吸收的方式处理回收尿液。

Lisovsky等^[58]在BIOS-3中直接将尿液加入种植植物的营养液中,试验结果表明在生保系统中按一定的模式直接将尿液加至植物营养液具有现实可行性。但是直接在植物营养液中加入尿液会引起卫生和乘员心理方面的问题。

在欧洲空间局的MELISSA系统中,尿液先经嗜热厌氧菌发酵降解,产生挥发性脂肪酸和铵根离子等物质,之后被由不产氧的光能自养/异养型生物吸收利用;其中未被完全吸收利用的铵根离子再由亚硝化单胞菌及硝化杆菌氧化为硝酸盐,作为氮源供给光能自养型藻类和高等植物^[59,60]。

利用植物的吸收作用可以在一定程度上回收尿液

中的营养物质,但尿液中大量盐分的积累会胁迫植物的正常生长^[61]。所以在回收尿液中营养物质的同时,还需分离其中的盐分以防止其对植物的生长造成影响。

在“月宫1号”为期105天的多人长期高闭度BLSS集成实验中,采用了减压蒸馏技术处理回收宇航员尿液,减压蒸馏技术是一种较为成熟的方法,能够在较低的温度下对水溶液进行蒸馏,避免水溶液中杂质的分解,进而提高出水水质。在实验过程中,首先将收集的乘员尿液加入减压蒸馏装置,尿液中的部分氨氮经蒸馏后会进入尿液冷凝水,含有氨氮的尿液冷凝水与卫生废水一起进入膜生物活性炭反应器进行二级处理,出水用于植物灌溉。在105天的实验中,一共收集处理了346 L的尿液,实现了20.5%的氮素回收率和100%的水分回收率^[62],大部分盐类物质和有机物以蒸馏残渣的形式排出系统以避免其对植物生长的影响。

也有其他研究表明低压蒸馏法可以有效地回收尿液中的水分并分离其盐分^[63],但该方法对营养物质的回收率较低,因此还需借鉴使用面向民用的尿液处理回收技术以提高营养物质的回收效率。

3.2 有望用于BLSS中的尿液处理回收技术流程

基于对目前面向空间站应用的尿液处理回收技术和面向民用的尿液处理回收技术的分析,本文提出了有望用于BLSS中的尿液处理回收流程,以期对相关研究提供参考。该流程其主要分为3部分,如图1所示,分别是①尿液的预处理;②尿液的处理回收;③处理回收后尿液的应用。

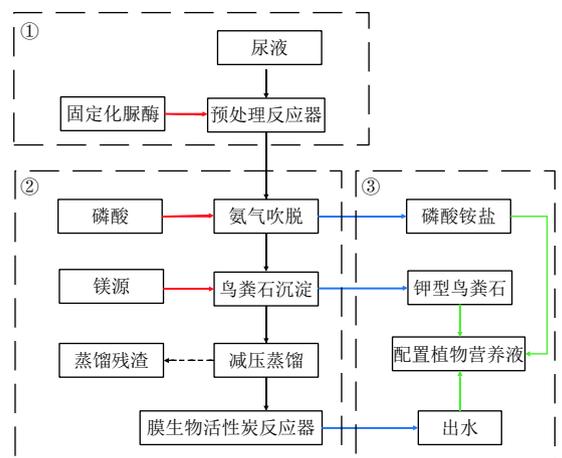


图1 BLSS内的尿液处理流程图

Fig. 1 Flow-process diagram of urine treatment in BLSS

1) 尿液的预处理

在回收尿液中的营养物质之前,需通过预处理技术将尿液中的尿素水解为植物可直接吸收利用的无机氮。

基于之前对多种尿液预处理技术的分析比较以及BLSS内的实际需求,选择反应条件较为温和的固定化

脲酶水解法用于尿液的预处理。将尿液收集于固定化脲酶预处理反应器中,预处理反应器主要由电机、金属连接杆、转盘、储酶管构成,如图2所示。装填了固定化脲酶的网状储酶管按一定顺序排列固定于转盘上,且储酶管可拆卸更换,转盘通过连接杆与电机相连,电极带动转盘旋转使储酶管与尿液充分接触,促进尿液中尿素的水解。

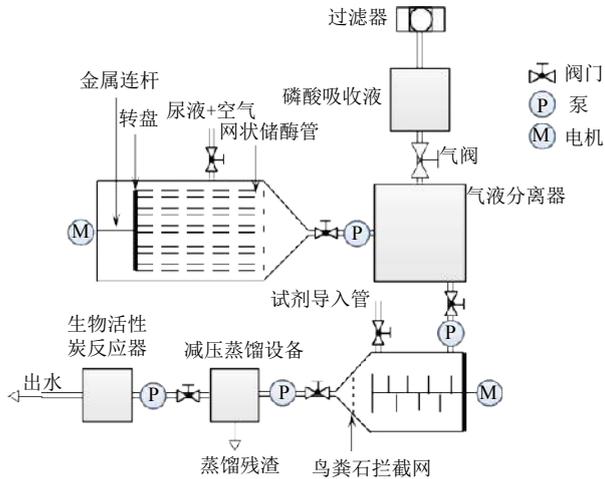


图2 BLSS内的尿液处理装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of urine treatment device in BLSS

2) 尿液的处理回收

经过预处理的尿液进入营养物质收集阶段,首先通过磷酸吸收法回收其中的氨氮,再通过鸟粪石沉淀法回收其中的磷和钾。

(1) 通过磷酸吸收回收尿液中的大部分氨氮

由于在微重力条件下,尿液与空气同时被收集,在空间站实际应用中需通过气液分离器将液体与气体分离。经气液分离器分离后,携带了氨气的空气流首先进入磷酸吸收液,以磷酸盐的形式回收氨氮,之后再通过过滤器进一步去除氨气后返回舱室内。

(2) 通过钾型鸟粪石沉淀技术回收尿液中的磷和钾

经气液分离器分离后,尿液出水进入鸟粪石沉淀反应器,如图2所示,反应器配有试剂导入管,用于添加可以促进鸟粪石沉淀的镁盐以及调节pH所需的试剂。考虑到未来在太空中的实际应用,反应器内设螺旋式搅拌以避免依赖重力。为了方便收集生成的钾型鸟粪石沉淀,可在沉淀反应器排水端前加装过滤网拦截颗粒物。当需要排出尿液废水时,只需将排水端的阀门打开,在泵的抽吸下,尿液即可进入下一处理环节;而沉淀物则被滤网拦截,可定期将反应器打开收集其中的钾型鸟粪石沉淀。

(3) 通过减压蒸馏技术回收剩余尿液中的水分

沉淀反应器的尿液出水直接排入减压蒸馏装置回收水分,蒸馏出水则进入膜生物活性炭反应器进行二级处理进一步去除尿液中可能含有挥发性物质,如未被完全回收的氨氮;大量盐分则以蒸馏残渣的形式排出系统。

3) 处理回收后尿液的应用

(1) 氨氮和磷酸盐均为植物生长所必需的元素,所以可将回收氨氮所得的产物磷酸铵盐直接用于植物营养液的配制。

(2) 回收尿液中钾和磷所得的产物钾型鸟粪石,可经溶解后用于植物营养液的配制,虽然鸟粪石能够以缓释肥的形式为植物提供营养物质,但为了更加精确地控制植物营养的供给,需将其溶解测定其中营养物质的含量后再用于植物营养液的配制。

(3) 膜生物活性炭反应器出水经紫外消毒后用于植物营养液的配制。

以上所述的有望用于BLSS中的尿液处理回收流程,旨在为相关研究提供参考,关于其在实际中使用的可行性及其处理效果,还需通过大量实验验证以及进一步优化。

4 结束语

尿液水分和营养物质的处理回收可在一定程度上提高物质循环利用效率,减少地面供给,节省航天任务开支,是载人深空探测活动的重要组成部分。美俄等航天大国已通过多年的研究实践,研发出成熟、高效、可靠的尿液水分回收技术。而随着载人深空探测活动的逐渐深入,尿液营养物质回收的重要性也日益凸显。

本文在分析比较了多种技术方法的基础上,基于BLSS的特点与实际需求,初步提出联合应用固定化脲酶尿液预处理、氨气吹脱吸收、鸟粪石沉淀以及减压蒸馏等技术的处理流程回收尿液中的氮、磷、钾和水分,以期为相关研究提供参考。为实现未来深空探测活动中尿液水分和营养物质的高效回收利用,还需在实践中不断探索。

参 考 文 献

- [1] HARRY W. J. The life cycle cost (LCC) of life support recycling and resupply[C]//45th International Conference on Environmental Systems. Washington, USA: ICES, 2015.
- [2] 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.

- [3] LIU H, YU C Y, MANUKOVSKY N S, et al. A conceptual configuration of the lunar base bioregenerative life support system including soil-like substrate for growing plants[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(6): 1080-1088.
- [4] HU E, BARTSEV S I, LIU H. Conceptual design of a bioregenerative life support system containing crops and silkworms[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45(7): 929-939.
- [5] 刘红, GITELZON I I, 胡恩柱, 等. 生物再生生命保障系统理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-10.
LIU H, GITELZON I I, HU E Z, et al. Theory and technology of bioregenerative life support system[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-10.
- [6] 刘红, 胡恩柱, 胡大伟, 等. 生物再生生命保障系统设计的基本问题[J]. *航天医学与医学工程*, 2008, 21(4): 372-376.
LIU H, HU E Z, HU D W, et al. Fundamental issues of bioregenerative life support system design[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2008, 21(4): 372-376.
- [7] LIND B B, BAN Z, BYDEN S. Volume reduction and concentration of nutrients in human urine[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16(4): 561-566.
- [8] UDERT K M, LARSEN T A, BIEBOW M, et al. Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system[J]. *Water Research*, 2003, 37(11): 2571-2582.
- [9] GRIGORIEV A I, SINYAK Y E, SAMSONOV N M, et al. Regeneration of water at space stations[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(9): 1567-1573.
- [10] SAMSONOV N M, BOBE L S, NOVIKOV V M. Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station [C]//24th International Conference On Environmental Systems and 5th European Symposium For Advancing Mobility on Space Environmental Control Systems. Friedrichshafen, Germany: SAE, 1994.
- [11] 丁平, 赵成坚, 姚菲菲, 等. 空间站洗浴废水净化技术研究[J]. *载人航天*, 2017, 23(1): 39-44.
DING P, ZHAO C J, YAO F F, et al. Study on treatment technology of bathing wastewater in space station[J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(1): 39-44.
- [12] 杨祺, 张文瑞, 于银银. 空间站尿液处理技术研究及进展[J]. *真空与低温*, 2014(6): 315-318.
YANG Q, ZHANG W R, YU K K. Research and development of techniques of urine processing[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2014(6): 315-318.
- [13] 杨松林, 丁平, 赵成坚, 等. 中国空间站水回收系统关键技术分析[J]. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(3): 221-226.
YANG S L, DING P, ZHAO C J, et al. Analysis of key techniques for water reclamation system in Chinese space station[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2013, 26(3): 221-226.
- [14] 蔡玉强. 蒸汽压缩蒸馏装置关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
CAI Y Q. The research of key technology on vapor compression distillation assembly [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [15] CARRASQUILLO R L, CLOUD D, BEDARD J. Status of the node 3 regenerative ECLSS water recovery and oxygen generation systems [C]//34th International Conference on Environmental Systems. Colorado, USA: SAE, 2004.
- [16] HOLDER D W, HUTCHENS C F. Development status of the international space station urine processor assembly[J]. *Molecular Ecology*, 2003, 24(18): 4679-4696.
- [17] BARTA D. Spacecraft water quality and monitoring needs for long duration human missions water recovery systems for human exploration of space[R]. Houston, USA: NASA Johnson Space Center, 2017.
- [18] CARTER D L. Status of the regenerative ECLSS water recovery system[C]//International Conference on Environmental Systems. USA: SAE, 2009.
- [19] EL-BOURAWI M S, DING Z, MA R, et al. A framework for better understanding membrane distillation separation process[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 285(1): 4-29.
- [20] CARTINELLA J L, CATH T Y, FLYNN M T, et al. Removal of natural steroid hormones from wastewater using membrane contactor processes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(23): 7381-7386.
- [21] BOBE L, SAMSONOV N, GAVRILOV L, et al. Regenerative water supply for an interplanetary space station The experience gained on the space stations "Salut", "Mir", ISS and development prospects[J]. *Acta Astronautica*, 2007, 61(1-6): 8-15.
- [22] SAMSONOV N M, BOBE L S, NOVIKOV V M, et al. Experience in development and operation of a regenerative system for water supply on mir space station [C]//30th International Conference on Environmental Systems. Toulouse, France: SAE, 2000.
- [23] SAMSONOV N M, BOBE L S, NOVIKOV V M, et al. Water supply based on water reclamation from humidity condensate and urine on a space station[C]//30th International Conference on Environmental Systems. Monterey, USA: SAE, 1996.
- [24] HOLLAND P J, MILLER C L, BIRD D M. Recovering potable water from wastewater in space platforms by lyophilization [C]//22nd International Conference on Environmental Systems. Seattle, USA: SAE, 1992.
- [25] 于涛, 马军. 冷冻浓缩-RO空间站尿处理系统与试验研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2007, 23(3): 298-302.
YU T, MA J. Combined freeze concentration and reverse osmosis technique for urine treatment in space station[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2007, 23(3): 298-302.
- [26] LIU X, CHEN M, BIAN Z, et al. Studies on urine treatment by biological purification using *Azolla* and UV photocatalytic oxidation[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(5): 783-786.
- [27] UDERT K M, LARSEN T A, GUJER W. Fate of major compounds in source-separated urine[J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(11-12): 413-420.
- [28] 雷锡琼. 不同氮肥配施有机物料对翠冠梨树体生长及品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
LEI X Q. Effects of different nitrogen fertilizers combined with organic materials on the growth of pear tree and fruit quality[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [29] SAHU J N, PATWARDHAN A V, MEIKAP B C. Response surface modeling and optimization for production of ammonia from urea in a batch reactor[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2010, 4(4): 462-470.
- [30] 张向宇, 高宁, 张波, 等. 高浓度尿素水解制氨试验研究[J]. *热力发*

- 电, 2016, 45(6): 57-62.
- ZHANG X Y, GAO N, ZHANG B, et al. Experimental study on ammonia preparation by high concentration urea hydrolysis[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(6): 57-62.
- [31] SHEN S, LI M, LI B, et al. Catalytic hydrolysis of urea from wastewater using different aluminas by a fixed bed reactor[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, 21(21): 1-6.
- [32] 李美娜. 原位镁铝水滑石的制备及其催化废水中尿素水解的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- Li M N. Preparation of In-situ Mg-Al Hydrotalcite and Its research on catalytic hydrolysis of urea in wastewater preparation of in-situ Mg-Al hydrotalcite and its research on catalytic hydrolysis of urea in wastewater [D]. Tai Yuan: TaiYuan University of Technology, 2015.
- [33] AMTUL Z, RAHMAN A U, SIDDIQUI R A, et al. Chemistry and mechanism of urease inhibition[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2002, 9(14): 1323-1348.
- [34] RAY H, SAETTA D, BOYER T H. Characterization of urea hydrolysis in fresh human urine and inhibition by chemical addition[J]. *Environmental Science Water Research & Technology*, 2018, 4(1): 87-98.
- [35] WUANG R, PENGKANG J, CHENGGANG L, et al. A study on the migration and transformation law of nitrogen in urine in municipal wastewater transportation and treatment[J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2013, 68(5): 1072.
- [36] LV M, MA X, ANDERSON D P, et al. Immobilization of urease onto cellulose spheres for the selective removal of urea[J]. *Cellulose*, 2018, 25(1): 233-243.
- [37] GARCIA-GALAN C, BERENQUER-MURCIA Á, FERNANDEZ-LAFUENTE R, et al. potential of different enzyme immobilization strategies to improve enzyme performance[J]. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 2011, 353(16): 2885-2904.
- [38] VELYCHKO T P, SOLDATKIN O O, MELNYK V G, et al. A novel conductometric urea biosensor with improved analytical characteristic based on recombinant urease adsorbed on nanoparticle of silicalite[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11(1): 106.
- [39] SHERIF H, MARTINO S, TRAVASCIO P, et al. Advantages of using non-isothermal bioreactors in agricultural waste water treatment by means of immobilized urease. Study on the influence of spacer length and immobilization method[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2002, 50(10): 2802.
- [40] SCHUSSEL L J, ATWATER J E. A urease bioreactor for water reclamation aboard manned spacecraft[J]. *Chemosphere*, 1995, 30(5): 985-994.
- [41] DENG S, XIE B, LIU H. The recycle of water and nitrogen from urine in bioregenerative life support system[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 123: 86-90.
- [42] 仇付国, 徐艳秋, 卢超, 等. 源分离尿液营养物质回收与处理技术研究进展[J]. *环境工程*, 2016, 34(11): 18-22.
- QIU F G, XU Y Q, LU C, et al. Research progress on nutrients recovery and treatment techniques[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(11): 18-22.
- [43] BELER-BAYKAL B, ALLAR A D, BAYRAM S. Nitrogen recovery from source-separated human urine using clinoptilolite and preliminary results of its use as fertilizer[J]. *Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2011, 63(4): 811-817.
- [44] KOCATÜRK N P, BAYKAL B B. Recovery of plant nutrients from dilute solutions of human urine and preliminary investigations on pot trials[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2012, 40(5): 538-544.
- [45] BOYER T H, LANDRY K, SENDROWSKI A, et al. Nutrient recovery from urine using selective ion exchange[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2012, 2012(15): 1942-1943.
- [46] TARPEH W A, KAI M U, NELSON K L. Comparing ion exchange adsorbents for nitrogen recovery from source-separated urine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(4): 2373-2381.
- [47] BAŞAKÇILARDAN-KABAKCI S, İPEKOĞLU A N, TALINLI I. Recovery of ammonia from human urine by stripping and absorption[J]. *Environmental Engineering Science*, 2007, 24(5): 615-624.
- [48] LIU B, GIANNIS A, ZHANG J, et al. Air stripping process for ammonia recovery from source - separated urine modeling and optimization[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2015, 90(12): 2208-2217.
- [49] 郝晓地, 兰荔, 王崇臣, 等. MAP沉淀法目标产物最优形成条件及分析方法[J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 1120-1125.
- HAO X D, LAN L, WANG C C, et al. Optimal formation conditions and analytical methods of the target product by map precipitation[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(4): 1120-1125.
- [50] GANROT Z. Urine processing for efficient nutrient recovery and reuse in agriculture[D]. Gothenburg: University of Gothenburg, 2005.
- [51] ETTER B, TILLEY E, KHADKA R, et al. Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal[J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 852-862.
- [52] ANTONINI S, PARIS S, EICHERT T, et al. Nitrogen and phosphorus recovery from human urine by struvite precipitation and air stripping in vietnam[J]. *Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica*, 2011, 39(12): 1099-1104.
- [53] GAO Y, LIANG B, CHEN H, et al. An experimental study on the recovery of potassium (K) and phosphorous (P) from synthetic urine by crystallization of magnesium potassium phosphate[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018(337): 19-29.
- [54] XU K, LI J, ZHENG M, et al. The precipitation of magnesium potassium phosphate hexahydrate for P and K recovery from synthetic urine[J]. *Water Research*, 2015(80): 71-79.
- [55] GANROT Z. Use of zeolites for improved nutrient recovery from decentralized domestic wastewater[M]. The Netherlands: Bentham Science Publishers, 2012.
- [56] LIND B B, BAN Z, BYDÉN S. Nutrient recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeolite and wollastonite[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 73(2): 169-174.
- [57] STRATFUL I, SCRIMSHAW M D, LESTER J N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate[J]. *Water Research*, 2001, 35(17): 4191-4199.
- [58] SALISBURY F B, GITELSON J I, LISOVSKY G M. Bios-3 Siberian experiments in bioregenerative life support attempts to purify air and grow food for space exploration in a sealed environment began in 1972[J]. *BioScience*, 1997, 47(9): 575-585.
- [59] DUSSAP C G, CORNET J F, GROS J B. Simulation of mass fluxes in the MELISSA microorganism based ecosystem[C]//23rd International

- Conference on Environmental Systems. Colorado, USA: SAE, 1993.
- [60] POUGHON L, DUSSAP C G, GROS J B. Preliminary study and simulation of the MELISSA loop including a higher plants compartment[C]//6th European Symposium on Space Environmental Control Systems. Noordwijk, The Netherlands: European Space Agency, 1997.
- [61] ABDALLAH S B, AUNG B, AMYOT L, Et al. Salt stress (NaCl) affects plant growth and branch pathways of carotenoid and flavonoid biosyntheses in *Solanum nigrum*[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38(3): 1-13.
- [62] XIE B, ZHU G, LIU B, et al. The water treatment and recycling in 105-day bioregenerative life support experiment in the palace 1[J]. *Acta Astronautica*, 2017(140): 420-426.
- [63] HUBER S J, THESIS M'S, WÄCHTER M, et al. Temperature dependent removal of sodium chloride (NaCl) from synthetic nitrified

urine [D]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, 2011.

作者简介:

朱国荣(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 生物再生生命保障系统中水循环技术。

通信地址: 北京市海淀区学院路37号北京航空航天大学大学生物与医学工程学院(100083)

电话: 18634916386

E-mail: zhugr6386@sina.com

刘红(1964-), 女, 教授, 主要研究方向: 特殊环境生命保障和生物安全。本文通讯作者。

通信地址: 北京市海淀区学院路37号北京航空航天大学大学生物与医学工程学院(100083)

电话: (010)82339837

E-mail: LH64@buaa.edu.cn

Analysis of Urine Treatment and Recovery Technology Used in Manned Deep Space Exploration

ZHU Guorong, XIE Beizhen, LIU Hong

(Institute of Environmental Biology and Life Support Technology,
School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: BLSS (Bioregenerative life support system) is a key technology for humans to conduct deep space exploration activities and realize long-term manned space flight. The urine wastewater treatment and recovery of the occupants is a very important part in the BLSS system. The large amount of water and nutrients contained in urine could be applied for the preparation of the nutrient solution required for plant growth in the system, which can not only ensure the normal growth of plants within the BLSS, but also contribute to the realization of the substances recycling and improvement in the closure of BLSS. The large amount of salt contained in urine would stress the growth of plants, so it is necessary to treat urine wastewater through certain technical means and recover water and nutrients. In the article, we analyzed several urine treatment technologies studied for space station, such as distillation technology, and then based on the needs of nutrients recovery, we discussed several mature and civilian urine treatment and recovery technologies, such as ion-exchange adsorption technology, ammonia stripping technology, and struvite precipitation technology. The prospects for the application of the urine treatment and recovery technologies in BLSS were discussed as well. In the end, based on the actual needs of BLSS, a urine treatment and recovery technology process that is expected to be used in BLSS is proposed.

Key words: bioregenerative life support system; urine; water; nutrient; recovery

High lights:

- Current urine treatment recovery technologies based on different application purposes are summarized, and the characteristics of various technologies are also comprehensively analyzed.
- Based on the characteristics and requirements of BLSS, a promising urine treatment recovery process expected to be used in BLSS is proposed.
- Given on the special environment of space, the design scheme of relevant reactors in the treatment recovery process is preliminarily proposed.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 任树芳]