

尿资源化技术研究进展

李政伟, 张金良*, 蔡明, 付健, 高小涛, 马浩

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 人的尿液中含有丰富的氮、磷、钾等营养组分, 具有产生量大、组分复杂、成分多样、资源性强的特点, 是一种良好的资源, 有较大的资源回收潜力。然而现有的尿液直接排放模式, 导致了极大的资源浪费。为提高人尿的资源化利用效率, 更好地实现人尿的资源化利用, 综述了人尿的几种资源化利用方式, 重点阐述了包括人尿中的营养物质回收和能源物质转化两类主要的资源化方式, 具体分析了不同资源化方式的原理、特点及研究现状, 剖析了人尿资源化利用应考虑的现实问题, 展望了人尿资源化利用的发展趋势, 以期为人尿的资源化利用提供技术参考和理论依据。

关键词: 人尿; 尿素; 磷; 钾

中图分类号: TQ442; X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)04-0018-08

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023040018

Review on Resource Technology of Human Urine / LI Zhengwei, ZHANG Jinliang*, CAI Ming, FU Jian, GAO Xiaotao, MA Hao / (Yellow river engineering consulting company limited, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Human urine is rich in nutrient components such as nitrogen, phosphorus and potassium, and is characterized by large production, complex components, diverse composition and resourcefulness, which is a good resource with a large resource recovery potential. However, the existing direct discharge mode of human urine leads to great resource waste. In order to improve the resource utilization efficiency and better realize the resource utilization of human urine, this article reviewed several resource utilization methods, focusing on two main types of methods including nutrient recovery and energy material conversion, specifically analyzing the principles, characteristics and research status of different methods, analyzing the practical problems that should be considered. The development trend was also analyzed to provide technical reference and theoretical basis for the resource utilization of human urine.

Key words: human urine; urea; phosphorus; potassium

人尿的主要成分为水, 含有较高的氮磷钾组分^[1]。尿液的排放量虽然仅占生活污水排放量的0.4%, 却贡献了污水中80%的氮、50%的磷和90%的钾^[2]。磷是生物圈中三大营养元素之一, 是不可再生的矿石性资源^[3], 是关乎农业正常生产的基石^[4]。全球界已探明的磷矿储量可使用不足100年^[5]。从2002年起我国国土资源部便已将磷矿列为国民经济发展急缺的20种重要矿产资源之一^[6]。我国每年排入自然水体损失的磷高达 1.5×10^6 t^[7], 约占2020年我国磷肥产能的6.9%^[8]。同样, 钾也是生物圈中三大营养元素之一, 是不可再生的矿石性资源。我国钾矿储量仅占世界探明的钾矿储量的1%, 我国对钾盐的需求高度依赖进口, 是世界

上钾盐进口量最大的国家^[9]。因此, 从尿液中回收不可再生的磷和钾意义重大。然而, 现有的尿液多和其他生活污水混合排放, 将具有资源属性的“氮、磷、钾”当作做“污染物”在污水处理厂进行“脱氮除磷”处理, 导致资源浪费^[10]。此外, 尿液中含有丰富的营养组分, 资源性强。基于此, 本文从尿液的性质特点、资源化技术、存在的问题等方面进行综述, 旨在为尿液的资源化推广应用提供参考和依据。

1 尿液的性质特点

1.1 尿液的产生量大

成人每日小便次数4~5次, 排尿量约1.0~1.5 L, 平均每年排尿约500 L^[11], 我国每年尿液的

收稿日期: 2022-10-08 **修回日期:** 2023-01-12

项目来源: 国家“十四五”重点研发计划课题(2021YFC3201302); 黄河勘测规划设计研究院有限公司博士后研究开发项目(2021BSHZL01); 水利技术示范项目(SF-202206)。

作者简介: 李政伟(1990-), 男, 河南省项城人, 博士后, 主要从事有机废弃物资源化研究等工作, E-mail: mengdeerjiayou@163.com

通信作者: 张金良, E-mail: zhang_jl@yrec.cn

产生量达 $4.5 \times 10^8 \text{ t}$ [12]。

1.2 尿液的组分复杂

尿液中含有约 95% 的水、3.5% 的有机物和 1.5% 的无机盐 [13]。其中有机物主要是尿素,其次是尿酸、肌酸、肌酸酐等 [14]。无机盐主要是钙、钠、镁、钾、磷酸盐、氯化物和硫酸盐等。1 个成年人每年排出尿液所含的营养组分完全可以满足 250 kg 谷物生长,这些谷物中所含能量和蛋白质基本可以维持 1 个成年人 1 年所需 [15]。此外,尿液中可能还有部分药物和激素等,包括消炎止痛药类、血脂调节药类和雌性激素类等 [16]。

1.3 尿液的成分多样

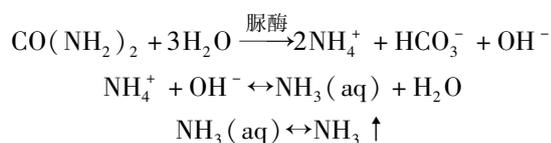
尿液的成分因人而异、因地区而异,即使同一个人同一天所排出的尿液,其中成分也有差别,主要取决于人的年龄、性别、饮食习惯、体型、健康状况、体育活动、环境以及社会文化等因素 [17-18]。

1.4 尿液的资源性强

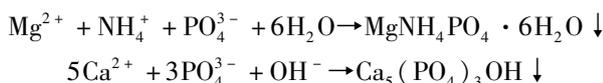
尿液中氮磷资源集中,易被作物吸收,氮的利用效率相当于同类无机肥料的 90% [12]。同时,相较于传统的矿业肥料和土壤自身的背景浓度,尿液中的重金属危害程度较轻 [19],直接用于农业生产带来的环境风险较低。

2 尿液的性质变化

尿液自人体排出后,其中的氮、磷以及 pH 值发生显著变化。新鲜尿液中氮的存在形式以尿素为主,存储过程中,尿素发生水解反应,生成具有刺激性气味的氨,从尿液中逸出,导致氮的损失,尿液中的氮的存在形式以氨氮为主 [20],涉及的主要化学反应为:



此外,尿素在水解后,pH 值升高,生成钙和镁的碳酸盐或磷酸盐沉淀 [21-22],导致磷的损失、管路堵塞等 [23],涉及的主要化学反应为:



健康人排出的新鲜尿液几乎不含微生物,在不接触外界环境的情况下,尿素水解的速度较慢。然而,在脲酶(尿素酰胺水解酶)的作用下,尿素会瞬间发生水解反应 [18]。产生脲酶的微生物广泛存在,

极易在尿液中生长繁殖。尿液排出人体后,在外界环境中微生物产生的脲酶作用下迅速水解 [24-25]。随着尿素的水解,尿液 pH 值升高,导致氨气逸出,最终导致氮的损失。因此,尿液在资源化利用之前,应注意对尿液进行稳定化预处理,预处理的方式包括加入脲酶抑制剂、降低尿液 pH 值等,以保证尿液可以长期有效贮存 [26-27]。

3 尿液的资源化技术

尿液中含有丰富的有机物和无机盐,可以将其中的营养物质进行回收,也可以将其转化为能源进行利用。本文将尿液的资源化技术主要分为营养物质回收技术和能源转化技术,各技术的特点如下。

3.1 营养物质回收技术

3.1.1 浓缩脱水技术

尿液的含水率超过 95%,可以采用浓缩脱水的方法提高尿液的营养物浓度,降低氨气的挥发量,减少尿液的储存体积,降低尿液的运输成本。尿液的浓缩脱水技术主要包括蒸发技术、冻融技术和反渗透技术。

蒸发技术(Evaporation)通过不断蒸发水分,使水分与溶质分离,实现溶质浓缩的过程 [28]。蒸发技术的浓缩产物包括氮、磷、钾、钠、硫等多种营养盐的结晶产物。Pahore [29] 等采用垂直纱布蒸发原理研发出水分数字迁移模型并实地验证,结果表明采用 $440 \sim 2060 \text{ cm}^2$ 的垂直蒸发板对尿液进行蒸发浓缩,可使 10 L 的尿液体积减小 80%。蒸发技术的影响因素包括溶液的表面压力、表面积、外部温差、顶部空气流速、搅拌速度等 [28]。Antonini [30] 等采用太阳能蒸发器研究了尿液的蒸发及磷的回收,结果发现,50 L 的尿液经 26 天蒸发可得到 360 g 固体肥料,肥料中含有 90% 的氯化钠、3% 的硫、2% 的氮、2% 的磷。蒸发技术最为简单直接,但存在能耗高、氨气挥发量大、污染物易残留等问题。

冻融技术(Freezing and Thawing, FT)利用尿液中水与溶质的凝固点的差异,通过降温实现水与溶质的分离,从而实现尿液的脱水。Lind [31] 等采用冷冻冻融法,将尿液在 $-14 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温冷冻后再在室温下融解,反复冻融 72 h,结果发现,尿液体积可缩小 75%,浓缩后的营养盐达 80%。冻融技术不仅可以实现尿液的浓缩分离,而且可以稳定尿液中的蛋白质 [32-33]。然而,由于所需温度较低,导致能耗高、经济性差、产物提取难度大,因此比较适合在寒冷地区

利用天然低温条件进行尿液的冻融。

反渗透技术(Reverse Osmosis, RO)通过在原水一侧施加比溶液渗透压高的外界压力,使原水透过半透膜时,只允许水透过,其他物质不能透过而被截留在膜表面的过程,从而实现水和溶质的分离,而且铵离子比其在不带电的状态下更易被截留在反渗透膜表面。闫宁宁等^[34]采用反渗透膜对小便池废水进行处理,结果发现,将人尿稀释5倍后,采用1.1 MPa压力条件下,BOD₅去除率达98.3%、氨氮去除率达97.7%、电导率降低96.1%,最后采用加碱性药剂和二氧化氯处理后可达到城市杂用水水质标准。于涛等^[35]采用冷冻浓缩与反渗透相结合的方法对尿液进行处理,结果发现,单级/多级冷冻浓缩能高效地去除尿液中的各种杂质,然后采用反渗透膜对融冰进行过滤,出水水质均可满足杂用水的水质标准。反渗透技术装置紧凑,运行稳定,浓水易于回收的优点,但是膜易污染。适用于空间站航天员尿液的处理及利用。

正渗透技术(Forward Osmosis, FO)利用膜两侧的渗透压梯度,使水从较高水化学势一侧(原水侧)通过正渗透膜自发流向较低水化学势一侧(汲取液侧),实现水与溶质的分离。Zhang等^[36]以NaCl溶液为汲取液,采用FO膜对比了人工配制新鲜尿液、人工配制水解尿液及尿液的处理效果,结果发现,FO膜对新鲜尿液的中性有机氮的截留率较低,对水解尿液的铵的截留率为50%~80%,对磷酸盐、钾的截留率达90%。刘乾亮^[37]等以NaCl溶液为汲取液,采用FO膜对新鲜尿液进行浓缩处理,结果发现,FO膜对尿液中的污染物具有很好的截留效果,对TOC、TN和氨氮的截留率分别达99.4%、99.2%和99.8%,然后采用去离子水清洗FO膜,膜的水通量可恢复至90%以上。正渗透技术具有高通量、低能耗、操作压力低等优点,但需要添加合适的汲取液^[38]。

膜蒸馏技术(Membrane Distillation, MD)以温度为驱动力,采用疏水性微孔膜作为膜材料,将加热形成的气体进入膜的另一侧,实现不同物质的分离。MD对于溶液中非挥发组分具有良好的分离效果,可以很好地实现溶液中盐与水的分离。Tun^[39]等采用直接接触式膜蒸馏系统(DCMD)对尿液进行处理,当渗透侧温度为20℃,进料侧温度为70℃时,尿液中氨氮的浓缩效果较好,比氨转移值仅有 2.06×10^{-3} gN/gH₂O。Zhao^[13]等利用真空膜蒸馏处理尿

液,结果发现,膜的通量随进料温度的升高逐渐增大,而随着时间的延长逐渐降低,水的回收率为31.9%~48.6%,NH₄⁺-N的去除率为40.6%~75.1%,COD的去除率达99.3%~99.5%。

3.1.2 沉淀结晶技术

沉淀结晶技术通过外加沉淀剂,与尿液中的营养物质结合形成晶体沉淀,从尿液中析出,实现营养物质与水的分离,包括磷酸铵镁法和磷酸镁钾法。Xu^[40]等采用 $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 菱镁矿和 $375 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 沸石对新鲜尿液和水解尿液分别进行处理,结果发现,新鲜尿液的pH值应调整到9.5~10.0左右,水解尿液无需调整pH值,最终实现尿液磷的回收率92.4%,氨氮回收率87.2%。Etter^[41]等以氧化镁为沉淀剂处理尿液,结果发现,在低镁剂量(1.1 mol Mg mol P)、粗尼龙过滤器(孔径 $60 \pm 50 \mu\text{m}$)以及处理时间为1 h的条件下,尿液中磷的去除率高达90%。沉淀结晶技术可以同时回收尿液中的多种营养元素如磷和氨氮,产物较纯净,可作为一种缓释型优质肥料。然而,含镁沉淀剂昂贵,导致沉淀结晶技术成本较高。Ronteltap^[42]等在25℃、pH值9.0和离子强度I为0.4 M的条件下,以磷酸铵镁法处理水解尿液,确定了磷酸铵镁沉淀在尿液中的溶度积为 $10^{-7.57}$,确定了鸟粪石的生成焓 $22.6 \pm 1.1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

此外,还可以利用异丁醛与尿素的缩合反应生成沉淀去除尿液中的氮,但异丁醛投加大,当加入尿素浓度5倍量的异丁醛时,尿素转化效率仅有75%,对于尿素含量较少的尿液缺乏经济可行性^[27]。

3.1.3 电化学技术

电化学技术(Electrochemistry, EC)利用特定的电化学反应器,通过电解质与电极之间的电化学反应降解废水中的污染物,同时具备脱氮、矿化、消毒功能^[43-45]。尿液的电化学处理技术主要涉及电催化氧化脱氮和电絮凝除磷。Inan^[46]等利用铁溶液作为电极材料去除人工配制尿液中的氮和磷,结果发现,在电流密度为 $5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、停留时间60 min、pH值8的条件下,当铁/养分摩尔比为1:1时,TP去除率为98%,当铁/养分摩尔比为4:1时,TN的去除率为21%。Ikematsu^[47]等利用铁和铂铱电极去除尿液中的氮和磷,结果发现,在电流密度为 $40 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的条件下,将铁电极作为阳极可以有效脱氮,将铁电极作为阴极时可以有效除磷,当总氮浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时,TN、TP和COD的去除率分别为95%、100%和85%。

电化学技术可以回收源分离尿液中的氮、磷,但也有可能产生新的污染物,这是由于在电化学技术氧化尿液过程中,氯离子在阳极氧化产生的活性氯与有机物之间会发生反应生成消毒副产物。Dibra^[48]等采用3种不同的阳极材料掺硼金刚石、不溶性阳极(IrO_2 和 RuO_2)和铂处理合成尿液,结果发现,采用掺硼金刚石电极材料处理尿液时产生大量的高氯酸盐。Jasper^[49]等通过在不同的处理时间、电流密度、氯化物浓度和阳极材料上处理黑水,结果发现,电解过程中产生的无机副产品(氯酸盐和高氯酸盐)和有机副产品(卤乙酸和三卤甲烷)在1个处理周期提高了10~30000倍。王飞^[50]等研究了电化学技术处理尿液及消毒副产物的生成调控机制,结果发现,当电流密度为25~100 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、耗电量为40 $\text{Ah}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,模拟尿液中游离氯的浓度由基本不变到快速升高,此后有机氯代消毒副产物减少,无机氯代消毒副产物增多,可以采用较高的电流密度、在折点时停止电解的措施,降低消毒副产物的浓度。

电化学技术具有占地面积小、建造成本低、运营需求少等优点,特别适合在分散式旱污水、畜禽养殖废水等小型、分散式水处理设施中应用。但存在回收率较低的问题。

3.1.4 吹脱技术

吹脱技术利用碱性条件下氨气易挥发的特点通过调节废水的pH值至碱性,将水中的 NH_4^+ 转化为游离氨 NH_3 ,再通入空气或者蒸汽使 NH_3 吹脱以达到除氮的目的,主要包括鼓风曝气吹脱-酸吸收法和热蒸汽气提-冷凝法,主要是去除尿液中的氮。张琳^[51]等采用吹脱-硫酸吸收工艺回收尿液中的氨氮,研究了pH值、吹脱温度、进气流量以及吹脱时间对吹脱效率及酸吸收效率的影响,结果表明,在pH值为11.5,进气流量为400 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$,温度为55℃的条件下吹脱2.5 h,氨氮的吹脱效率达96.5%,吸收效率达100%。Sibel^[52]等采用吹脱-硫酸吸收工艺回收尿液中的氨氮,计算了不同pH值水平和空气流速下,尿液-空气相互作用的综合传质系数,结果发现,在空气流量为0.21 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,pH值为12的条件下,传质速率最高可达0.085 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,氨氮的吹脱效率为92%。Liu^[53]等利用改造的双膜模型研究了空气吹脱法回收分离尿液中氮的效率和成本,结果发现,较高的空气流量和温度可以降低运行成本,而调整pH值将提高运行成本。在单位液体空气流

速为14 $\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}$,温度为50℃,运行时间2.2 h,pH值9.3的条件下,氨氮的吹脱效率为80%,运行成本最低,仅为每立方146元的尿液。Tian^[54]等采用真空热汽吹脱工艺结合酸吸收作为预处理,以硫酸铵的形式从水解尿液中回收氨,结果表明,在60℃、21.3 kPa,不调节pH值、运行时间3 h的条件下,氨的传质系数最大为17.6 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,N的回收效率为80%,回收负荷为36 $\text{kgN}\cdot\text{m}^{-3}$ 尿液,单位体积尿液可盈利1.9 $\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

吹脱技术在污水处理领域较为成熟,具有氨回收效率高、效果稳定、操作简便和容易控制等优点。不足之处在于能耗高,回收产物是液态硫酸铵或氨水,不便于进一步储存与应用。

3.1.5 离子交换吸附技术

离子交换吸附技术采用离子交换和吸附相结合的方法,将水解尿液中的 NH_4^+ 转移到吸附材料中,然后将吸附后的材料直接作为固体肥料回用或再生用于生产液态肥料和可重复使用的吸附剂,常用的离子交换剂主要包括沸石、活性炭和石灰石^[55]等。Tarpeh^[56]等采用离子交换吸附技术对尿液进行了技术验证和初步经济建模,结果发现,相比传统污水处理方式,采用离子交换法对尿液进行处理的费用降低40%,制备硫酸铵的生产成本远低于商用肥料成本。Baykal^[57]等采用斜发沸石处理尿液,结果发现当初始铵浓度为110 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,最高表面浓度为15.44 $\text{mgNH}_4^+\cdot\text{g}^{-1}$ 斜发沸石,当装载量为1 $\text{mgNH}_4^+\cdot\text{g}^{-1}$ 斜发沸石时,氨的去除率最高可达98%,当装载量为9.73 $\text{mgNH}_4^+\cdot\text{g}^{-1}$ 斜发沸石,仅通过自来水就可洗涤。Kocaturk^[58]等采用斜发沸石处理稀释尿液,结果表明,氮和磷的回收率可分别达86%和96%,而不能回收钾,吸附养分后的斜发沸石的肥效与化肥肥效相当,肥效高于直接施用原始和稀释尿液。

离子交换吸附技术主要依靠吸附材料,具有适用范围广的特点,可同步去除尿液中的氮和磷。但是吸附材料的吸附容量和回收营养物质的浓度有限,从1 L尿液中完全回收氮磷需要约700 g斜发沸石,而其他吸附材料如活性炭价格昂贵,因此单独采用离子交换吸附技术处理尿液,存在经济性差的问题。可通过与磷酸铵镁沉淀或冻融等方法结合,利用吸附剂进行后处理的方式降低处理成本^[59]。

3.1.6 生物处理技术

生物处理技术利用植物、动物或者微生物尤其是氨氧化细菌的氧化作用对尿液的氮进行回收处

理,通过将尿液中的氨氮氧化为硝氮或亚硝氮,实现尿液稳定化处理的目的。Yang^[60]等通过种植空心菜去除预处理尿液中的营养物质,结果发现,空心菜在1:50稀释比的预处理尿液中生长良好,生长速度为 $0.68\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$,菜叶片增长数为 $2.27\text{ 片}\cdot\text{d}^{-1}$,茎干质量为 0.33 g ,含水量为 93.86% ,COD去除率为 $58\% \sim 66\%$,TN去除率为 $41\% \sim 49\%$,总悬浮固体去除率为 47% 。邹雪^[61]等采用不同接种污泥的序批式活性污泥系统(SBR)对源分离尿液进行处理,结果发现,采用硝化污泥接种的SBR对尿液中的可生化降解有机物具有较高的去除效率,而对其中氨氮的硝化效率较低,接种好氧硝化颗粒污泥接种的SBR对尿液中有机物和氨氮的转化效率都超过 90% 。Feng^[62]等采用微生物硝化+螺旋藻吸收组合技术对尿液进行处理,结果发现,调节pH值和未调节pH值尿液中氨氮的转化效率分别为 95% 和 50% ,硝化处理后的尿液可以作为螺旋藻良好的营养液。

由于尿液中氨氮的浓度很高且碳氮比相对较低,采用生物处理技术存在氨氮转化效率低的问题,还需要与其他技术结合使用,以提高尿液的资源化效率。

3.2 能源转化技术

尿液中的有机物可通过转化为能源进行回收和利用,常用的尿液能源转化技术包括微生物燃料电池回收电能技术、植物培养制作生物质燃料技术等。

微生物燃料电池(Microbial fuel cell, MFC)利用微生物将有机物中的化学能直接转化为电能。尿液中的铵离子、碳酸根离子、钙离子等是天然电解质,尿液电解处理会在阴极产生氨气和氢气,不仅可以产生电能,还能回收 57% 的氮^[63]。Ieropoulos^[64]等首次研发了以尿液作为MFC原料,对比分析了不同体积MFC的功率大小,结果发现,体积大小不同的MFC,其功率大小差别较小,尿液转换为电能的效率为 50% 。王秋辰^[65]等以人工配制尿液为底物,研究了曝气方式与膜材料对双室MFC产电性能和脱氮效果的影响,结果表明,当进水COD浓度为 $1500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、C/N为2的条件下,COD降解率达 89% ,总氮去除率超过 72% ,采用阳离子交换膜,最高输出电压为 702.1 mV ,最大输出功率密度为 $365.14\text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ 。陈稳稳^[66]等采用新型超级电容器材料修饰尿液微生物燃料电池,结果显示,超级电容器活性

炭修饰后的MFC最大功率密度为 $555.1\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$,是未进行修饰MFC最大功率密度的1.8倍。

植物培养制作生物质燃料技术采用植物吸收尿液中的氮、磷用于提供自身生长,而后将植物制作生物质燃料,达到间接利用尿液回收能源的目的,主要采用藻类对尿液进行处理。Tuantet^[67]等研究了短光路光生物反应器在尿液中连续生长的索氏小球藻的养分去除率和生物产量,首次证明了在人类尿液中连续培养微藻的可能性,最低稀释因子为2(50%体积/体积尿液),光路为 10 mm 时,最大生物产量达 $14.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,微藻中含有 $43\% \sim 53\%$ 的蛋白质和 $16\% \sim 25\%$ 的总脂肪酸。Adamsson^[68]采用尿液种植微藻,结果发现,微藻的在114 d和30 d的平均生物量分别为 $133 \pm 82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $39 \pm 17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Behera^[69]等采用响应面法研究了尿液培养微藻工艺参数,结果发现,在尿液体积分数为 6.50% ,pH值为 7.69 ,光照强度为 205.40 lx 的条件下,生物产量最大为 $211.63 \pm 1.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,脂肪含量为 $26.27\% \pm 1.94\%$,比对照组高 39.2% 。

4 结论

人的尿液含有丰富的氮、磷、钾组分,是一种良好的资源。在资源化过程中应注意首先对尿液进行稳定化处理,以减少营养物质的损失。在此基础上,综合考虑成本、能耗、需求、条件等因素,适宜地选择尿液的资源化方式,为了提高尿液的资源化效率,可以综合采用不同的资源化方式,突破单一资源化方式的局限性。相对于人的粪便而言,人的尿液的污染程度较轻,在实际的应用过程中,应考虑将尿液在源头进行分离,研发不同模式下尿液的源头分离技术,避免受到粪便的污染,从而降低利用难度。目前,尿液的资源化利用方式还多停留在实验室研究阶段,仍存在不足之处。随着科技的不断发展,尿液的资源化利用工艺将会更加先进,其资源化应用将会受到越来越多的重视和越来越大的推广。

参考文献:

- [1] 李政伟, 张金良, 马军, 等. 人粪尿资源化技术研究进展[C]. 中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场, 天津, 2021.
- [2] Pronk W, Palmquist H, Biebow M, et al. Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine [J]. *Water Research*, 2006, 40

- (7):1405–1412.
- [3] 郝晓地, 王崇臣, 金文标. 磷危机概观与磷回收技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [4] 张汉泉, 周峰, 许鑫, 等. 中国磷矿开发利用现状 [J]. 武汉工程大学学报, 2020,42(02):159–164.
- [5] Cordell D, Drangert J, White S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought [J]. *Global Environmental Change*, 2009,19(2):292–305.
- [6] 陶俊法. 应正确定位我国磷矿资源的现状与前景——我国磷矿资源服务年限分析 [J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(03):6–8.
- [7] Liu B, Yu Q, Zhang B, et al. Does the green watch program work? Evidence from a developed area in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010,18:454–461.
- [8] 王莹, 方俊文, 李博. 2020 年我国磷复肥行业运行情况与发展趋势 [J]. 磷肥与复肥, 2021,36(07):1–8.
- [9] 白仟. 中国钾盐产业发展环境分析与发展战略研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [10] 李燕. 污水处理脱氮除磷工艺的研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2020,38(06):105–107.
- [11] Chang Y, Wu Z, Bian L, et al. Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine [J]. *Applied Energy*, 2013,102:427–431.
- [12] 于广泉, 张丹丹, 张春雪, 等. 源分离尿液替代化肥农业利用的前景及存在问题 [J]. 农业资源与环境学报, 2022,39(02):256–265.
- [13] Zhao Z, Xu L, Shang X, et al. Water regeneration from human urine by vacuum membrane distillation and analysis of membrane fouling characteristics [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013,118.
- [14] Medeiros D L, Queiroz L M, Cohim E, et al. Human urine fertilizer in the Brazilian semi-arid: Environmental assessment and water-energy-nutrient nexus [J]. *Science of The Total Environment*, 2020,713:136145.
- [15] 伦斯. 分散式污水处理和再利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [16] Lienert J, Bürki T, Escher B I. Reducing micropollutants with source control: substance flow analysis of 212 pharmaceuticals in faeces and urine [J]. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2007,56(5):87–96.
- [17] Upreti H K, Shrestha P, Paudel P. Effect of human urine as fertilizer on crop production [J]. *Agronomy Journal of Nepal*, 2011:168–172.
- [18] 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.
- [19] 蒋善庆, 王晓昌, 李超, 等. 源分离尿液资源化利用与风险控制技术研究进展 [J]. 安全与环境学报, 2014,14(05):174–182.
- [20] 徐康宁, 李继云, 张驰, 等. 尿液废水腐熟肥化技术研究 [J]. 中国给水排水, 2013,29(15):14–18.
- [21] 田时雨, 蒯兴宇, 黄涛, 等. 尿液收集储存过程中的性质变化及其资源化利用 [J]. 环境工程, 2021,39(02):66–72.
- [22] Liu Z, Zhao Q, Wang K, et al. Urea hydrolysis and recovery of nitrogen and phosphorous as MAP from stale human urine [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(8):1018–1024.
- [23] 曾俊钦, 邱春生, 孙力平, 等. 储存控制条件对尿液氮磷的影响 [J]. 环境工程学报, 2016,10(10):5605–5610.
- [24] 李超. 蒸发结晶法回收源分离尿液中营养物质研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [25] Hotta S, Funamizu N. Inhibition factor of ammonification in stored urine with fecal contamination [J]. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2008,58:1187–1192.
- [26] Maurer M, Pronk W, Larsen T A. Treatment processes for source-separated urine [J]. *Water Research*, 2006,40(17):3151–3166.
- [27] 郑向勇, 叶海仁, 程天行, 等. 源分离尿液处理技术的研究进展 [J]. 水处理技术, 2012,38(12):16–20.
- [28] 郑诗怡. 煤制气浓盐水蒸发结晶制工业盐工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [29] Pahore M M, Ito R, Funamizu N. Rational design of an on-site volume reduction system for source-separated urine [J]. *Environmental Technology*, 2010,31(4):399–408.
- [30] Antonini S, Nguyen P T, Arnold U, et al. Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam [J]. *Science of The Total Environment*, 2012,414:592–599.
- [31] Lind B, Ban Z, Bydén S. Volume reduction and concentration of nutrients in human urine [J]. *Ecological Engineering*, 2001,16(4):561–566.
- [32] 李启沅, 何旭珩, 王县, 等. 前处理方法及冻融次数对尿液蛋白标志物质量影响的探究 [J]. 转化医学杂志, 2017,6(05):257–260.
- [33] 刘博莹, 王达, 姜泓, 等. 保存条件与反复冻融对尿

- 砷形态稳定性的影响[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(09):771-773.
- [34] 闫宁宁, 张振家, 迟莉娜. 反渗透技术在小便池废水回用中的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2006(08):77-79.
- [35] 于涛, 马军, 张立秋, 等. 冷冻浓缩-RO工艺处理空间站尿液试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006(04):567-569.
- [36] 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]. *Environmental Science Technology*, 2014, 48(6):3386-3394.
- [37] 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(09):16-19.
- [38] Das P, Singh K K K, Dutta S. Insight into emerging applications of forward osmosis systems[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 72:1-17.
- [39] Tun L L, Jeong D, Jeong S, et al. Dewatering of source-separated human urine for nitrogen recovery by membrane distillation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 512:13-20.
- [40] Xu S, Luo L, He H, et al. Nitrogen and phosphate recovery from source-separated urine by dosing with magnesite and zeolite[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(5):2269-2275.
- [41] 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.
- [42] Ronteltap M, Maurer M, Gujer W. Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine[J]. *Water Research*, 2007, 41(5):977-984.
- [43] Li H, Yu Q, Yang B, et al. Electro-catalytic oxidation of artificial human urine by using BDD and IrO₂ electrodes[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015, 738:14-19.
- [44] Cho K, Kwon D, Hoffmann M R. Electrochemical treatment of human waste coupled with molecular hydrogen production[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(9):4596-4608.
- [45] 黄琳琳, 戴常超, 刘峻峰, 等. CFD模拟用于电催化反应器电极结构及进水方式的优化[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10):2742-2750.
- [46] Inan H, Alaydin E. Phosphate and nitrogen removal by iron produced in electrocoagulation reactor[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(7-9):1396-1403.
- [47] Ikematsu M, Kaneda K, Iseki M, et al. Electrolytic Treatment of Human Urine to Remove Nitrogen and Phosphorus[J]. *Chemistry Letters CHEM LETT*, 2006, 35:576-577.
- [48] Dbira S, Bensalah N, Ahmad M, et al. Electrochemical Oxidation/Disinfection of Urine Wastewaters with Different Anode Material[J]. *Materials*, 2019, 12:1254.
- [49] Jasper J T, Yang Y, Hoffmann M R. Toxic Byproduct Formation during Electrochemical Treatment of Latrine Wastewater [J]. *Environmental Science Technology*, 2017, 51(12):7111-7119.
- [50] 王飞, 刘峻峰, 张杰, 等. 电化学氧化对尿液处理过程中消毒副产物的生成控制和去除[J]. 环境工程学报, 2021, 15(09):2973-2984.
- [51] 张琳, 李子富, 张扬, 等. 吹脱法回收源分离尿液中氨氮的试验研究[J]. 环境工程, 2014, 32(03):38-42.
- [52] Baaşçılardan Kabakci S, ipekoğlu A N, Talinli I. Recovery of ammonia from human urine by stripping and absorption[J]. *Environmental Engineering Science*, 2007, 24(5):615-624.
- [53] 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.
- [54] Tian X, Gao Z, Feng H, et al. Efficient nutrient recovery/removal from real source-separated urine by coupling vacuum thermal stripping with activated sludge processes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220:965-973.
- [55] 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 and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2011, 63(4):811-817.
- [56] Tarpeh W A, Wald I, Omollo M O, et al. Evaluating ion exchange for nitrogen recovery from source-separated urine in Nairobi, Kenya[J]. *Development Engineering*, 2018, 3:188-195.
- [57] Beler Baykal B, Bayram S, Akkaymak E, et al. Removal of ammonium from human urine through ion exchange with clinoptilolite and its recovery for further reuse[J]. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2004, 50(6):149

- 156.
- [58] 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.
- [59] Ban Z S, Dave G. Laboratory studies on recovery of n and p from human urine through struvite crystallisation and zeolite adsorption[J]. *Environmental Technology*, 2004,25(1):111-121.
- [60] Yang L, Giannis A, Chang V W C, et al. Application of hydroponic systems for the treatment of source-separated human urine[J]. *Ecological Engineering*, 2015,81:182-191.
- [61] 邹雪, 孙飞云, 杨成永, 等. 利用好氧硝化颗粒污泥 SBR 处理分离尿液的研究[J]. *环境科学*, 2007(09):1987-1992.
- [62] Feng D, Wu Z, Xu S. Nitrification of human urine for its stabilization and nutrient recycling[J]. *Bioresource Technology*, 2008,99(14):6299-6304.
- [63] Luther A K, Desloover J, Fennell D E, et al. Electrochemically driven extraction and recovery of ammonia from human urine[J]. *Water Research*, 2015,87:367-377.
- [64] Ieropoulos I A, Greenman J, Melhuish C. Miniature microbial fuel cells and stacks for urine utilisation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013,38(1):492-496.
- [65] 王秋辰, 徐苏云, 王重阳. 曝气方式对微生物燃料电池脱氮和产电性能的影响[J]. *广州化工*, 2018,46(11):58-60.
- [66] 陈稳稳, 刘中良, 侯俊先, 等. 新型超级电容器材料修饰尿液微生物燃料电池阳极的研究[J]. *工程热物理学报*, 2018,39(08):1818-1823.
- [67] Tuantet K, Temmink H, Zeeman G, et al. Nutrient removal and microalgal biomass production on urine in a short light-path photobioreactor [J]. *Water Research*, 2014,55:162-174.
- [68] Adamsson M. Potential use of human urine by greenhouse culturing of microalgae (*Scenedesmus acuminatus*), zooplankton (*Daphnia magna*) and tomatoes (*Lycopersicon*) [J]. *Ecological Engineering*, 2000,16(2):243-254.
- [69] Behera B, Patra S, Balasubramanian P. Biological nutrient recovery from human urine by enriching mixed microalgal consortium for biodiesel production[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020,260:110111.