



源分离尿液资源化利用研究进展

王 舒, 李 楠

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

[摘要] 针对源分离尿液富含氮、磷等多种营养元素,且具有较高资源回收潜力的特点,首先概述了源分离尿液的特征,重点总结了源分离尿液的氮、磷回收技术(浓缩脱水技术、吸附技术、化学沉淀技术、生物处理技术、电化学技术),并对各项技术的研究进展进行了阐述;然后分析了源分离尿液在农业生产和同步产电领域的应用价值;最后通过展望源分离尿液的发展趋势,指出未来应进一步提高源分离尿液处理过程中氮、磷资源的回收率并将其应用于实际污水处理,以期为实现源分离尿液的资源化、无害化和规模化提供参考。

[关键词] 源分离尿液;氮磷回收;农业利用;同步产电;资源化

[中图分类号] X799.3;X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)06-0033-07

Research progress on resource utilization of source-separated urine

WANG Shu, LI Nan

(School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Source-separated urine contains large amounts of nutrients including nitrogen and phosphorus, which has the high resource recovery potential. In this review, the characteristics of source-separated urine were firstly summarized. The recovery technologies of nitrogen and phosphorus (such as concentration and dehydration technology, adsorption technology, chemical precipitation technology, biological treatment technology and electrochemical technology) were expounded in details, and the research progress of various technologies were described. Then, the application value of source-separated urine in agricultural production and synchronous electricity generation was analyzed. Finally, it was pointed out that the future research should be focused on improving the recovery rate of nitrogen and phosphorus in the process of urine separation and applying it to practical wastewater treatment by outlooking the development trend of source-separated urine. This review provided a reference for the true application for urine harmlessness, recycling, and enlarged scale production.

Key words: source-separated urine; nitrogen and phosphorus recovery; agricultural utilization; synchronous electricity generation; resource utilization

尿液中含有大量氮、磷、钾等营养元素,是城市生活污水中氮、磷的主要来源之一^[1]。尽管尿液仅占生活污水体积的1%,但却贡献了污水处理厂总营养负荷中80%的氮、50%的磷和90%的钾。污水处理系统中超过70%的负荷来源于氮磷去除(氮、磷能耗分别为 4.5×10^7 J/kg和 4.9×10^7 J/kg)^[2-3],氮磷废水排放不当不仅会引发水体富营养化、造成水质污染、增加污水处理负荷,同时还会导致氮磷资源流失。

20世纪90年代,欧洲国家的一些研究者提出从源头分离尿液并进行污水处理的想法,源分离技术

应运而生^[1]。源分离技术通过简单的功能设计,将尿液、冲洗水与粪便污水分开收集、输送、存储,根据其各自特点进行针对性处置,尿液的单独处理成为可能。被单独收集处理的尿液根据处理后的水质,可以选择排入城市污水管网或用作城市回用水,从而显著降低城市污水处理厂的氮磷负荷,提高处理效率^[4]。此外,处理后的尿液还可以就近返回土地被农作物利用^[5]。目前工业活性氮需求量约为120 Mt/a,而成人尿液的人均产生量为1.4 L/d,全球尿液中的含氮量约为30 Mt/a^[6-7],尿液中的氮若得到

合理回收利用,则可覆盖部分工业活性氮的需求;理论上从收集的尿液中可回收 1.8 Mt/a 磷,折合成鸟粪石(MAP)约为 14.2 Mt/a^[8]。尿液中资源丰富,如果对其分离和处理,不仅可缓解水体富营养化和资源储量短缺的压力,而且有助于资源的有效回收。

笔者主要总结归纳了源分离尿液的基本特性、源分离尿液回收氮磷技术的研究现状,以及源分离尿液在农业生产、同步产电等方面的应用,进而展望了源分离技术未来的发展方向。

1 源分离尿液特征

源分离尿液具有如下特征:

(1) 氮、磷浓度高。虽然源分离系统中冲洗水体积一般为原尿体积的几倍甚至几十倍,污染物浓度在一定程度上被稀释,但源分离尿液中总氮仍不低于 300 mg/L;与总氮相比,部分磷酸根在收集和储存时会发生沉淀反应,总磷不超过 100 mg/L^[9]。

(2) 碳氮比低。通常情况下,原尿液的 COD 约为 8 000 mg/L,总氮约为 7 000 mg/L。但源分离尿液在收集、存储过程中易发生有机物降解,导致 C/N<1,无法满足活性污泥的生长需求,同时会对微生物活性造成抑制或损害,导致污泥膨胀、流失、上浮等问题。如果对尿液进行源分离处理,剩余污水中的 C/N 将提高至 32 左右,使得污水更适宜进行生物法处理,从而强化微生物脱氮除磷效果。

(3) 氮、磷存在形式较为单一。源分离尿液中氮主要以尿素形式存在,也有少量以氨氮形式存在;存储过程中尿素在脲酶作用下被转化为氨氮和碳酸氢盐,二者比例由水解程度决定。磷主要以正磷酸盐形式存在^[6]。

(4) 元素种类丰富。源分离尿液中通常含有 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺等阳离子和 SO₄²⁻、Cl⁻等阴离子,还包含多种微量元素^[10]。

(5) 易水解。源分离尿液的 pH 范围为 5.6~6.8,完全水解后的尿液 pH 在 9.0 左右^[9]。pH 升高会导致沉淀过程的发生,同时改变尿液的离子浓度。

2 源分离尿液回收技术

在实际分离、收集和存储过程中,尿液的易水解特性将带来诸多问题。尿液中氨氮浓度和 pH 均较高,极易引起氨挥发,这不仅会造成氮损失,而且会散发异味,最终影响营养物质回收和空气质量。因

此,在源分离尿液处理过程中,一般有以下目的:减少尿液体积便于存储和处理,同时实现氮、磷资源回收^[11]。目前,从源分离尿液中回收氮、磷等营养元素的技术可以分为浓缩脱水技术、吸附技术、化学沉淀技术、生物处理技术、电化学技术及其他技术等。

2.1 浓缩脱水技术

尿液含水率≥95%,其余成分为尿素和无机盐。直接收集得到的源分离尿液贮存和运输成本较高,不利于集中处理和后续肥料应用,因此有必要对其进行浓缩脱水以减小体积。目前常用的手段有蒸发和冻融。

蒸发是去除尿液中水分最直接的方法,通过浓缩尿液中的非挥发性化合物,可得到具有微量营养素的肥料产品^[12]。李刚^[13]对尿液进行蒸发浓缩处理,每升 pH=4 的尿液可得到 37.3 g 干燥结晶产物,其中 N、P(以 P₂O₅计)、K(以 K₂O)的质量分数分别为 16%、5%和 6%;X 射线衍射(XRD)分析结果显示回收晶体的主要成分是 NH₄Cl(约占 80%),NaCl 和 KCl 分别占 15%和 4%。K. M. UDERT 等^[14]在 78 °C、20 kPa 的条件下通过实验室小型蒸发器对部分硝化尿液中的水分进行去除,最终得到了高浓度液体产品。A. FUMASOLI 等^[15]将蒸发技术应用于具有蒸汽压缩和热回收功能的商业蒸馏反应器中,得到 N、P、K 质量分数分别为 5%、0.2%和 2%的浓缩营养液。

尽管蒸发具有操作简便且易于运行和管理的特点,但是尿液蒸发过程中仍会面临氨损失和能耗较高导致的碳排放高的问题。氨损失可以通过酸化来避免,对尿液进行能量回收或利用清洁能源可以减少碳排放。例如越南某高校利用太阳能作为替代热源进行蒸发中试实验,经过 26 d 的太阳照射,从 50 L 酸化尿液(pH<4)中回收了大约 360 g 的固体肥料^[16]。

冻融是根据低温下水分子首先形成冰晶体,而营养盐和其他化合物仍然呈溶液状态的原理实现水分与溶质分离的。B. B. LIND 等^[17]在 -14 °C 条件下对尿液进行冷冻处理,大约 80% 的营养物质可以被浓缩在原始体积 25% 的尿液中。H. GULYAS 等^[18]通过使用降膜和搅拌型冷冻浓缩器证实了采取冷冻处理可实现尿液浓缩的效果。根据商业冷冻浓缩器的运行数据,将尿液体积减少 80% 需要消耗的能量为 1 100 MJ/m³。

蒸发是从尿液中去除水分最直接的技术,但实际处理过程中需考虑其高能耗与高运行成本,冻融更适用于寒冷地区。

2.2 吸附技术

尿液的吸附处理技术是将离子交换与吸附相结合,将尿液中的营养物质转移到吸附材料中,从而达到回收的目的。目前常用的吸附材料主要包括活性炭、生物炭和沸石^[19]。

沸石可以提高贫瘠土壤养分,同时又是保水性极好的土壤调节剂^[20]。M. MAURER等^[21]于2006年首次报道了利用沸石进行离子交换从尿液中回收氮。近期研究发现,沸石对尿液中的磷酸盐具有90%以上的吸附率,并且回收后的整体肥性与普通商用肥料相近^[22]。除沸石外,生物炭是另一种被广泛应用于氮回收的吸附剂。W. A. TARPEH等^[23]通过比较用于氮回收的各种吸附剂的性能,得出生物炭对尿液中氮的最大吸附容量(29 mg/g)与沸石(32 mg/g)相近;一些合成阳离子交换树脂更高效,例如Dowex Mac 3型树脂对氮的最大吸附容量为56 mg/g, DOWEX 50型树脂为45 mg/g。W. A. TARPEH等^[24]与Sanergy企业合作,首次在肯尼亚建立了Dowex Mac 3型树脂回收氮的试点,第一阶段的运行结果显示与实验室相似的吸附容量,还需要长期运行的实验数据才能验证该技术的可持续性。尿素形式的氮是尿液中唯一的非离子营养物质,M. GANESAPILLAI等^[25-26]通过测试生物炭对尿素的吸附,得出静态批式实验中生物炭对尿素的吸附容量为750 mg/g,而动态柱实验中吸附容量仅为94 mg/g;由于这些实验都是在中性pH条件下进行的,尿素不稳定、极易水解,有可能对测量结果造成干扰。

通过测试载有水合氧化铁纳米颗粒的商用型阴离子交换树脂对磷酸盐的吸附情况,A. SENDROWSKI等^[27]建立了尿液吸附动力学方程和平衡模型,在 ≤ 5 min的时间内,树脂对磷酸盐的最大吸附容量为5.2 mg/g,磷去除率高达97%。Kangning XU等^[28]发现,在生物炭表面负载MgO可以显著提高生物炭对氮磷的吸附,氮、磷吸附容量分别可以达到47.5、116.4 mg/g。

吸附技术操作简单且成本较低,然而该方法适用于氨氮低于500 mg/L的体系。氨氮过高会使材料再生操作过于频繁,既不利于反应的长时间连续进行,还会增加维护成本。

2.3 化学沉淀技术

化学沉淀法是指通过投加外加沉淀剂将氨氮和磷酸盐以沉淀形式去除的方法。磷酸根会与 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等离子形成沉淀,因此沉淀法同样适用于尿液磷回收。采用 Mg^{2+} 作为沉淀剂是目前最受欢迎的

方法,其中一个原因可能是投加 Mg^{2+} 沉淀形成的MAP结晶可直接用作缓释磷肥^[29]。镁源通常以 MgO 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 MgCl_2 或卤水(食盐生产中富含镁的盐水)的形式存在。M. RONTELTAP等^[30]的研究表明,MAP的溶解度与温度呈正相关,颗粒大小随着过饱和度(β_s)的降低而增加。D. M. RODRIGUES等^[31]进一步确定饱和指数 $[\text{SI}=\lg(\beta_s)]$ 在2.7~3.5时,可同时获得高磷回收率和大尺寸MAP颗粒。Zhigang LIU等^[2]以 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 作为沉淀剂,在 $\text{pH}=8.5$ 、 $n(\text{Mg}^{2+}):n(\text{NH}_4^+-\text{N}):n(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})=(1.2\sim 1.3):1:1$ 、混合速度为120 r/min、反应时间和沉淀时间分别为15 min和3 h的条件下,得到了95%以上的氨氮去除率和85%以上的磷去除率,同时可形成类似于纯MAP的晶体。E. TILLEY等^[32]在自然沉降模式下通过静置沉淀与添加镁源相结合的方式处理尿液,最终磷去除率为24%;而以MAP沉淀模式进行磷去除,回收效率可达70%,总磷去除率超过90%。除MAP沉淀外,常见的磷回收产物还有 FePO_4 和 AlPO_4 ,但是植物对 FePO_4 和 AlPO_4 的可利用性以及 AlPO_4 可能的毒性还存在激烈争论^[33]。

采用 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 等沉淀剂进行处理时,只有稳定尿液才适合作为化学沉淀技术的基质。由于形成了其他竞争产物, Al^{3+} 与磷酸盐的沉淀仅在低pH条件下才能发生。而对于 FePO_4 的生成,目前尚无一致定论,Xiangyong ZHENG等^[34]报道了在 $\text{pH}<9$ 的条件下,通过使用Fe电极产生 Fe^{3+} 对磷酸根进行沉淀可以得到较好的结果;M. K. PERERA等^[35]以 FeCl_3 形式投加铁盐进行沉淀,当 $\text{pH}>7.5$ 时,产生的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 絮合物会干扰 FePO_4 沉淀的生成。以 Ca^{2+} 进行沉淀时,竞争产物 CaCO_3 同样会影响 Ca^{2+} 与磷酸根形成沉淀。

2.4 生物处理技术

生物除氮是利用各种微生物间的相互作用,通过厌氧氨氧化、硝化、反硝化等一系列过程将氨氮、硝氮转化为氮气的过程。生物除磷是利用污泥中某些特性微生物在好氧条件下摄取磷,并将磷以聚磷酸盐的形式积累于细胞内,再以剩余污泥形式排出。K. M. UDERT等^[36]将1:1(物质的量比)的铵/亚硝酸盐溶液添加到厌氧氨氧化污泥中,30 °C时反硝化速率为1 000 g/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),氨氮与亚硝酸盐的去除量比(物质的量比)为1:1.18,表明厌氧氨氧化可以从源分离尿液中去除氮;将硝化和厌氧氨氧化工艺组合可以去除75%~85%的氮。尽管反硝化可以进行氮去除,但对尿液中磷的去除还有

待探究^[37]。

尿液经稀释后可以用来培养藻类(微藻、小球藻、螺旋藻等)。K. TUANTET等^[38]在连续的光生物反应器中对尿液进行稀释,并添加缺失的营养物质,在pH=7的条件下进行了为期8个月的优化。当最低稀释因子为2时,微藻最大氮吸收速率为 $1\,300\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,最大磷吸收速率为 $150\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。贾莹^[39]的研究表明源分离尿液可以作为小球藻的培养基质,在小球藻最佳生长条件(pH=7.0)下,总氮和总磷去除量分别为 60.7 mg/L 和 7.0 mg/L 。Chenliang YANG等^[40]以模拟尿液作为基质培养螺旋藻,当初始总氮和总磷分别为 100 mg/L 和 13 mg/L 时,经过8 d的培养,生物量增加3倍,总氮和总磷去除率均超过99%。B. PILTZ等^[41]通过搭建多孔基质生物反应器-固定化微藻系统,回收得到了氮、磷质量分数分别为5%和2%的生物质,氮去除率为13%,磷去除率为94%。陈清阳^[42]通过小球藻与沸石联用的方法处理尿液,最终氨氮去除率为62%,磷酸盐去除率为65%;在此基础上构建微藻光生物反应器,最终氨氮去除率最高为75%,磷酸盐去除率最高为78%。

尽管生物法对环境友好、不易产生二次污染,但是尿液属于高含氮废水,在实际处理过程中生物脱氮可能受温度、碳氮比等因素影响,且必须经过物化预处理将其降低到活性污泥或生物膜等微生物可接受的浓度水平后才能进行高效脱氮。此外,生物法还存在处理周期长、需要外加碳源等缺点。

2.5 电化学技术

电化学技术的原理是:在电流作用下,污染物在电极上以直接电解或间接电解的方式进行转移转化,从而达到被去除的目的。在电化学技术中,选用合适的电极材料是决定电化学处理效果的关键,不同电极材料对废水中污染物的降解机理不同。传统处理使用Fe、Al电极通过电絮凝去除氮、磷;而Ti、Pt电极通过电解水产生 OH^- 提高电极附近的pH^[43],氨氮转化为氨气后通过气体逸散方式去除。M. IKEMATSU等^[44]通过电解产氯构建电化学体系,以PtIr电极为阳极并施加0.25 V以上电压,处理后的尿液可成功进行回用;在此基础上,该团队以尿液为处理对象,利用PtIr电极和Fe电极进行电催化脱氮除磷,在进行尿液脱氮处理时以Fe电极作为阳极、PtIr电极为阴极,当尿液中的总氮较低($<1\,000\text{ mg/L}$)时,氮去除率可达95%以上,同时COD去除率为85%;进行尿液除磷处理时将

阴阳极互换,最终磷去除率可达100%。C. C. Wang等^[45]以Pt为阳极、Ni为阴极,在外加电压3~12 V的条件下,可以回收得到纯度高达94.5%~96.1%的MAP结晶。A. HUG等^[46]首次使用Mg板作为阳极,通过电解牺牲Mg电极的方式从尿液中得到MAP结晶,实现了电化学技术在尿液营养物质回收中的重大突破。H. INAN等^[47]以模拟尿液为研究对象,以Fe盘作为电极构建电化学系统,在电流密度为 $5\text{ mA}/\text{cm}^2$ 、pH=8时,总氮去除率为20%。W. A. TARPEH等^[48]将电解-电渗析装置与氨气气提技术相结合对尿液进行处理,在间歇模式下氨氮去除率为93%,在连续模式下氨氮去除率为50%。

尽管电化学技术在处理源分离尿液过程中具有操作简单、设备占地面积小、受外界环境影响小、磷回收率高的优势,但是处理过程中会产生较高的能耗,因此需要进一步优化操作条件来降低运行成本。

2.6 其他回收技术

源分离尿液处理技术还包括空气吹脱、臭氧氧化、膜分离等技术^[49]。吹脱技术的突出优点是能从尿液中回收纯氨,但是经吹脱气提处理后的废水中仍含有一定浓度的氨氮,易造成二次污染,不能直接排放,难以实际应用。臭氧氧化技术主要针对的是源分离尿液中的微污染物质,一般需经过吹脱/酸化预处理。采用膜分离技术处理尿液时,膜的优良分离特性可以将大部分微污染物与营养盐分离,然而膜污染问题突出且膜成本较高,在实际应用中膜分离技术通常作为预处理技术,需要和化学沉淀技术联合使用。

3 源分离尿液资源化利用现状

3.1 在农业生产中的应用

尿液中含有丰富的营养成分,具备作为肥料的潜力。许多研究表明,源分离尿液处理后直接用于作物种植能显著提高农作物的产量^[50]。H. HEINONEN-TANSKI等^[51]将尿液用于黄瓜种植,施用尿液的作物产量($3.1\text{ kg}/\text{m}^2$)与施用商业肥料的作物产量($2.4\text{ kg}/\text{m}^2$)基本相当甚至略高,并且施加尿液组的黄瓜中也并未检测到任何相关的肠道微生物。S. K. PRADHAN等^[52]评估了尿液对白菜生长的影响,未施肥组白菜产量为 $5.5\text{ kg}/\text{m}^2$,施加商业肥料组的白菜产量为 $7.6\text{ kg}/\text{m}^2$,而使用尿液作为肥料后,白菜产量有了明显提升($8.4\text{ kg}/\text{m}^2$)。杨皓元^[53]对尿液进行了预处理并评价了其用于蔬菜种植的效果,结果显示将尿液用于土培小

白菜和空心菜时的最适添加量为 10 mL/kg,将尿液和草木灰共同施用时小白菜产量最高为 8.52 g/株,高于化肥对照组的 8.06 g/株;空心菜最高产量为 11.29 g/株,与化肥对照组的 11.26 g/株相当。Linyan YANG 等^[54]在水培莴菜时加入了处理后的尿液,莴菜生长良好且出水水质得到净化,COD 去除率为 58%~66%,总氮去除率为 41%~49%。

3.2 氮磷回收与同步产电

作为一种生物资源,尿液中含有大量的尿素、有机质等,蕴含着丰富的化学能。尿液具有较强的缓冲能力,可成为微生物燃料电池(MFC)的燃料或者基质,同时 MFC 也能耐受较高的氨氮浓度^[55]。2012 年, I. IEROPOULOS 等^[56]首次证实以尿液作为基质的 MFC 能够产生电能。2013 年该团队进一步证实,与其他有机原料如乙酸钠相比,尿液是更加优质的发电原料,利用尿液作为基质的堆叠式 MFC 可为一台商业手机充电 40 h^[57]。C. SANTORO 等^[58]发现单室无膜 MFC 以新鲜尿液作为基质并在 Pt 催化的情况下,系统能够获得的最大电流为 0.18 mA。D. A. JADHAV 等^[59]利用双室 MFC 来处理尿液,进水 COD 为 3 000 mg/L 时的最大功率密度为 5.2 W/m³,氨氮去除率为 77% 左右,最大电流密度为 48 mA/cm²。Guolong ZANG 等^[60]将 MAP 与 MFC 结合起来处理尿液,磷去除率为 94.6%,氨氮去除率为 28.6%,COD 去除率为 64.9%,最大功率密度为 2.6 W/m³。Zhaoxi SHEN 等^[61]构建了新型脱氮燃料电池(DFC)并将其用于尿液处理,总氮去除率高达 98.6%,TOC 矿化率可达 54.6%,该体系能同步实现尿液净化和化学能到电能的转化;考虑到尿液中含有充足的电解质,运行此系统时无需额外提供电解质,极大地节省了运行成本。Meiling LIAO 等^[62]运用镁空气燃料电池(MAFC)技术从尿液中以 MAP 形式回收氮磷,处理 25 min 后磷去除率高达 99%,最大功率密度为 0.6 W/m³,回收得到的 MAP 纯度高达 98%;通过电化学沉淀和电化学氧化协同作用,该课题组成功实现了尿液氮磷回收与同步产电。

4 展望

对源分离尿液进行分离处理,一方面可以提升出水水质、降低污水处理厂的运行成本,另一方面可回收尿液中的营养物质及潜在能源。尿液的资源化利用具有良好的经济效益与环境效益。未来对源分离尿液的资源化研究应多从以下几方面考虑:

(1) 对源分离尿液处理的研究重点应倾向于以资源化利用为目的的回收处理技术,这不仅能体现源分离技术的优越性,同时也更加符合现阶段可持续发展与节能减排的需求。

(2) 目前关于源分离尿液中营养物质回收以及能源转化等资源化利用途径的相关研究大多处于实验室规模或中试研究阶段,如何进一步提高氮磷资源回收率并将其应用于实际污水处理将是未来研究的重要方向。

(3) 通过形成鸟粪石沉淀对尿液中氮磷资源进行回收这一技术已经趋于成熟,但该技术回收成本较高,需考虑和其他技术联合应用以降低运行成本。

(4) 通过电化学技术将尿液用来发电具有广阔的发展前景,无论是从对尿液处理还是从资源可持续发展方面来看都具有重要的研究和应用价值。

(5) 现有处理技术多为单一工艺,无法对尿液彻底进行资源化处理或达标排放,后续需侧重开发组合工艺来实现源分离尿液资源化处理。

参考文献

- [1] LARSEN T A, GUJER W. Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine) [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(3/4): 87-94.
- [2] LIU Zhigang, ZHAO Qingliang, WANG Kun, 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.
- [3] MAURER M, SCHWEGLER P, LARSEN T A. Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(1): 37-46.
- [4] WILSENACH J, VAN LOOSDRECHT M. Impact of separate urine collection on wastewater treatment systems [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(1): 103-110.
- [5] WILSENACH J A, VAN LOOSDRECHT M C M. Effects of separate urine collection on advanced nutrient removal processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(4): 1208-1215.
- [6] LARSEN T A, RIECHMANN M E, UDERT K M. State of the art of urine treatment technologies: A critical review [J]. *Water Research X*, 2021, 13: 100114.
- [7] RAZON L F. Reactive nitrogen: A perspective on its global impact and prospects for its sustainable production [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2018, 15: 35-48.
- [8] MIHELICIC J R, FRY L M, SHAW R. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 832-839.
- [9] FITTSCHEN I, HAHN H H. Characterization of the municipal

- wastewaterpart human urine and a preliminary comparison with liquid cattle excretion[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 38(6): 9-16.
- [10] UDERT K M, LARSEN T A, GUJER W. Fate of major compounds in source-separated urine [J]. *Water Science and Technology*, 2006, 54(11/12): 413-420.
- [11] SENECAI J, VINNERÅS B. Urea stabilisation and concentration for urine-diverting dry toilets: Urine dehydration in ash [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 650-657.
- [12] HARDER R, WIELEMAKER R, LARSEN T A, et al. Recycling nutrients contained in human excreta to agriculture: Pathways, processes, and products [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49(8): 695-743.
- [13] 李刚. 优化传质条件提高直接尿素燃料电池产电性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LI Gang. Improving electrical generation performance of direct urea fuel cell by optimizing mass transfer conditions [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [14] UDERT K M, WÄCHTER M. Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation [J]. *Water Research*, 2012, 46(2): 453-464.
- [15] FUMASOLI A, ETTER B, STERKELE B, et al. Operating a pilot-scale nitrification/distillation plant for complete nutrient recovery from urine [J]. *Water Science and Technology*, 2016, 73(1): 215-222.
- [16] 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.
- [17] LIND B B, BAN Z, BYDÉN S. Volume reduction and concentration of nutrients in human urine [J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16(4): 561-566.
- [18] GULYAS H, BRUHN P, FURMANSKA M, et al. Freeze concentration for enrichment of nutrients in yellow water from no-mix toilets [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(6): 61-68.
- [19] KIANI D, SHENG Yiyang, LU Baoying, et al. Transient struvite formation during stoichiometric (1:1) NH_4^+ and PO_4^{3-} adsorption/reaction on magnesium oxide (MgO) particles [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(1): 1545-1556.
- [20] RAMESH K, REDDY D D. Chapter four: Zeolites and their potential uses in agriculture [J]. *Advances in Agronomy*, 2011, 113: 219-241.
- [21] MAURER M, PRONK W, LARSEN T A. Treatment processes for source-separated urine [J]. *Water Research*, 2006, 40(17): 3151-3166.
- [22] 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*, 2011, 63(4): 811-817.
- [23] TARPEH W A, UDERT K M, NELSON K L. Comparing ion exchange adsorbents for nitrogen recovery from source-separated urine [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(4): 2373-2381.
- [24] 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.
- [25] GANESAPILLAI M, VENUGOPAL A, ANANTHAKRISHNA V, et al. Influence of process parameters on sorption capacity of microwave activated biosorbents for urea recovery from human urine: A comparative study [J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2015, 10(3): 438-449.
- [26] SIMHA P, ZABANIOTOU A, GANESAPILLAI M. Continuous urea-nitrogen recycling from human urine: A step towards creating a human excreta based bio-economy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 4152-4161.
- [27] SENDROWSKI A, BOYER T H. Phosphate removal from urine using hybrid anion exchange resin [J]. *Desalination*, 2013, 322: 104-112.
- [28] XU Kangning, LIN Fangyu, DOU Xiaomin, et al. Recovery of ammonium and phosphate from urine as value-added fertilizer using wood waste biochar loaded with magnesium oxides [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 205-214.
- [29] WEI S P, VAN ROSSUM F, VAN DE POL G J, et al. Recovery of phosphorus and nitrogen from human urine by struvite precipitation, air stripping and acid scrubbing: A pilot study [J]. *Chemosphere*, 2018, 212: 1030-1037.
- [30] RONTETAP M, MAURER M, GUJER W. The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine [J]. *Water Research*, 2007, 41(9): 1859-1868.
- [31] RODRIGUES D M, DO AMARAL FRAGOSO R, CARVALHO A P, et al. Recovery of phosphates as struvite from urine-diverting toilets: Optimization of pH, $\text{Mg}:\text{PO}_4$ ratio and contact time to improve precipitation yield and crystal morphology [J]. *Water Science and Technology*, 2019, 80(7): 1276-1286.
- [32] TILLEY E, ATWATER J, MAVINIC D. Recovery of struvite from stored human urine [J]. *Environmental Technology*, 2008, 29(7): 797-806.
- [33] CORNEL P, SCHAUM C. Phosphorus recovery from wastewater: Needs, technologies and costs [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59(6): 1069-1076.
- [34] ZHENG Xiangyong, KONG Hainan, WU Deyi, et al. Phosphate removal from source-separated urine by electrocoagulation using iron plate electrodes [J]. *Water Science & Technology*, 2009, 60(11): 635-640.
- [35] PERERA M K, ENGLEHARDT J D, DVORAK A C. Technologies for recovering nutrients from wastewater: A critical review [J]. *Environmental Engineering Science*, 2019, 36(5): 511-529.
- [36] UDERT K M, FUX C, MUNSTER M, et al. Nitrification and autotrophic denitrification of source-separated urine [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(1): 119-130.
- [37] STROUS M, HEIJNEN J J, KUENEN J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology Biotechnology Advances*, 1998, 50(5): 589-596.

- [38] TUANTET K. Microalgae cultivation for nutrient recovery from human urine[D]. Wageningen: Wageningen University, 2015.
- [39] 贾莹. 小球藻在源分离尿液中生长和去除氮磷的特性研究[D]. 北京:清华大学, 2011.
- JIA Ying. Study on growth of *Chlorella vulgaris* and removal of nitrogen and phosphorus in source-separated urine[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [40] YANG Chenliang, LIU Hong, LI Ming, et al. Treating urine by *Spirulina platensis*[J]. Acta Astronautica, 2008, 63: 1049-1054.
- [41] PILTZ B, MELKONIAN M. Immobilized microalgae for nutrient recovery from source-separated human urine[J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 30(1): 421-429.
- [42] 陈清阳. 微藻光生物反应器对尿液中氮磷的去除研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- CHEN Qingyang. Removal of nitrogen and phosphorus from urine by microalgae photobioreactor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [43] CHUN Daye, LIM C R, LEE H S, et al. Electrochemical treatment of urine by using $\text{Ti}/\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ electrode[J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, 26: 1-9.
- [44] IKEMATSU M, KANEDA K, ISEKI M, et al. Electrolytic treatment of human urine to remove nitrogen and phosphorus[J]. Chemistry Letters, 2006, 35(6): 576-577.
- [45] WANG C C, HAO X D, GUO G S, et al. Formation of pure struvite at neutral pH by electrochemical deposition[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 159(1/2/3): 280-283.
- [46] HUG A, UDERT K M. Struvite precipitation from urine with electrochemical magnesium dosage[J]. Water Research, 2013, 47(1): 289-299.
- [47] INAN H, ALAYDIN E. Phosphate and nitrogen removal by iron produced in electrocoagulation reactor[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(7/8/9): 1396-1403.
- [48] TARPEH W A, BARAZESH J M, CATH T Y, et al. Electrochemical stripping to recover nitrogen from source-separated urine[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(3): 1453-1460.
- [49] VOLPIN F, CHEKLI L, PHUNTSHO S, et al. Optimisation of a forward osmosis and membrane distillation hybrid system for the treatment of source-separated urine[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 212: 368-375.
- [50] 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(2): 256-265.
- YU Guangquan, ZHANG Dandan, ZHANG Chunxue, et al. Prospects and problems in the agricultural utilization of source-separated urine as a substitute for chemical fertilizers[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 256-265.
- [51] HEINONEN-TANSKI H, SJÖBLOM A, FABRITIUS H, et al. Pure human urine is a good fertiliser for cucumbers[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(1): 214-217.
- [52] PRADHAN S K, NERG A M, SJÖBLOM A, et al. Use of human urine fertilizer in cultivation of cabbage (*Brassica oleracea*): Impacts on chemical, microbial, and flavor quality[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(21): 8657-8663.
- [53] 杨皓元. 尿液水解预处理效能及其用于蔬菜种植的效果评价与风险分析[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- YANG Haoyuan. Efficiency of urine hydrolysis pretreatment with its effect evaluation and risk analysis for vegetable cultivation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [54] YANG Linyan, 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.
- [55] KUNTKE P, GELEJI M, BRUNING H, et al. Effects of ammonium concentration and charge exchange on ammonium recovery from high strength wastewater using a microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(6): 4376-4382.
- [56] IEROPOULOS I, GREENMAN J, MELHUISH C. Urine utilisation by microbial fuel cells; energy fuel for the future[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(1): 94-98.
- [57] IEROPOULOS I A, LEDEZMA P, STINCHCOMBE A, et al. Waste to real energy: The first MFC powered mobile phone[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15(37): 15312-15316.
- [58] SANTORO C, IEROPOULOS I, GREENMAN J, et al. Current generation in membraneless single chamber microbial fuel cells(MFCs) treating urine[J]. Journal of Power Sources, 2013, 238: 190-196.
- [59] JADHAV D A, JAIN S C, GHANGREKAR M M. Cow's urine as a yellow gold for bioelectricity generation in low cost clayware microbial fuel cell[J]. Energy, 2016, 113: 76-84.
- [60] ZANG Guolong, SHENG Guoping, LI Wenwei, et al. Nutrient removal and energy production in a urine treatment process using magnesium ammonium phosphate precipitation and a microbial fuel cell technique[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(6): 1978-1984.
- [61] SHEN Zhaoxi, BAI Jing, ZHANG Yan, et al. Efficient purification and chemical energy recovery from urine by using a denitrifying fuel cell[J]. Water Research, 2019, 152: 117-125.
- [62] LIAO Meiling, LIU Yuan, TIAN Enling, et al. Phosphorous removal and high-purity struvite recovery from hydrolyzed urine with spontaneous electricity production in Mg-air fuel cell[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 391: 123517.

[作者简介] 王舒(1995—), 在读博士。电话: 13102213129, E-mail: 1547558774@qq.com。通讯作者: 李楠, 博士, 教授。E-mail: nli@tju.edu.cn。

[收稿日期] 2022-03-31(修改稿)