



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于源分离人尿的资源化利用技术研究进展

于广泉, 郑向群, 魏孝承, 成卫民, 张春雪, 杨波, 徐艳

引用本文:

于广泉, 郑向群, 魏孝承, 成卫民, 张春雪, 杨波, 徐艳. 基于源分离人尿的资源化利用技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 266–275.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0326>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

农村资源化公共厕所技术和实施的效益分析

时义磊, 曹智, 周律

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 677–685 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0340>

农林生物质直燃电厂灰渣资源化技术分析与展望

石炎, 薛聪, 邱宇平

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 127–139 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0147>

山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究

杜艳玲, 周怀平, 程曼, 解文艳, 杨振兴, 郭晋, 吕倩倩, 王志伟

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 329–336 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0161>

多级处理模式下粪污中氮、磷削减规律及其农田可消纳量——以苏南水网地区规模猪场为例

靳红梅, 吴华山, 郭瑞华, 黄红英

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 237–244 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0312>

城乡有机废弃物资源化利用现状及展望

李龙涛, 李万明, 孙继民, 褚飞, 饶中秀, 黄凤球

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 264–271 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0150>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

于广泉, 郑向群, 魏孝承, 等. 基于源分离人尿的资源化利用技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 266–275.

YU G Q, ZHENG X Q, WEI X C, et al. Advances in resource utilization technology for source-separated human urine[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 266–275.



开放科学 OSID

基于源分离人尿的资源化利用技术研究进展

于广泉, 郑向群*, 魏孝承*, 成卫民, 张春雪, 杨波, 徐艳

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:人尿中含有丰富的营养物质, 随意排放不仅带来环境污染, 而且会造成资源的浪费。近几年, 源分离人尿的资源化利用在工程领域受到了越来越多的关注。本文综述了以资源化利用为目的的人尿处理技术, 包括农田利用技术、氮回收技术、磷回收技术、钾回收技术及生化药品提取技术, 旨在为我国人尿高效资源化利用寻求可推广可应用的技术方法。综述结果表明尿液具有巨大的资源回收利用潜力, 用于处理源分离尿液的技术有很多, 但是除了直接还田技术外, 其他技术均还停留在实验室研究阶段, 尿液资源化利用技术的实际工程应用还有待进一步研究推广。

关键词:人尿; 农田利用; 氮回收; 磷回收; 钾回收; 资源化利用

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2022)02-0266-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0326

Advances in resource utilization technology for source-separated human urine

YU Guangquan, ZHENG Xiangqun*, WEI Xiaocheng*, CHENG Weimin, ZHANG Chunxue, YANG Bo, XU Yan

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Human urine is rich in nutrients, and random discharge not only results in environmental pollution, but also wastes these nutrient resources. In recent years, the separate collection and treatment of human urine have received increasing attention in the engineering community. This article summarizes the properties of human urine and focuses on several important treatment technologies for the purpose of resource reclamation from human urine, including technologies for farmland utilization, nitrogen, phosphorous and potassium recovery and biochemical drug extraction. This review clearly indicates that urine has huge resource recycling value and a wide range of technical options is available to treat separately-collected urine effectively. However, with the exception of direct farmland utilization, none of the processes described have advanced beyond the laboratory stage. Considerable development remains to be undertaken to optimize urine-processing techniques and apply them in a practical engineering setting.

Keywords: human urine; farmland utilization; nitrogen recovery; phosphorus recovery; potassium recovery; resource utilization

世界人口增长和农作物生长需求增加了肥料消耗^[1]。据联合国粮农组织(FAO)报告统计, 2015—2018年, 世界对化肥[氮(N)肥, 磷(P)肥, 钾(K)肥]的需求量平均每年增长1.8%, 化肥消耗量平均每年增加约 3.35×10^6 t。预计到2100年, 世界人口将达到112亿, 且这一趋势将继续上升^[2]。对化肥需求的增

加不仅会影响到原材料的供应, 还会影响到温室气体的排放和水体富营养化状况。事实上, 目前世界主要能源消耗的1%~2%源于氨肥生产(2008年为 1.3×10^8 t)。作为副产品, 每产生1 t氨, 就会释放出2~3 t二氧化碳。因此, 氨生产行业产生的温室气体约占全球温室气体排放的0.93%^[3]。与此同时, 作为P肥主要来

收稿日期: 2020-06-18 录用日期: 2020-08-25

作者简介: 于广泉(1992—), 男, 江西都昌人, 硕士研究生, 从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: 18447055394@163.com

*通信作者: 郑向群 E-mail: zhengxiangqun@126.com; 魏孝承 E-mail: 13752221539@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800201); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2020LM08)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800201); Special Fund for Basic Scientific Research of Central Public Welfare Institutes(Y2020LM08)

源的高质量、高品位P矿资源正在趋向枯竭。然而,P消耗率的预测结果各不相同,2018年的一项研究估计,到2100年,资源消耗将达到20%~60%^[4]。据预测,经济上可行的P矿储量将在大约100年内耗尽。与此同时,全球K矿分布不均将给缺K国家的农业生产带来重大风险^[5-6]。

目前关于尿液的处理利用主要有两种途径:一是经化粪池排入污水管网,最终进入污水处理厂^[7];二是和粪便一起经化粪池处理或单独收集后还田^[8]。然而,随着对尿液研究的不断深入,尿液的价值逐渐被发现。在人类排泄物中,尿液是N、P、K的主要贡献者,贡献率分别为88%、67%、73%^[9]。人类尿液被认为是一种可再生的营养资源^[10]。尿液源分离,即利用单独设置的小便器或粪尿分集式便器将尿液单独收集起来,并进行处理和资源回收利用,该方法引起了越来越多研究者的关注^[11]。在城市污水中,尿液只占废水总量的1%,其N、P、K量却占废水中总N的75%~87%、总K的50%~90%、总P的40%~50%^[12]。从可持续发展的角度出发,尿液源分离技术的应用能够更好地管理家庭废水和分散的卫生设施,尿液分离不仅可以显著降低城市污水处理厂和下游污水接受水体的负荷,还能回收N、P、K等营养成分,生产出合适的产品^[13]。近年来,很多国家特别是缺乏卫生设施和肥料工业的发展中国家,对人尿资源化利用技术进行了大量研究^[14]。研究显示,如能充分回收或再利用人尿中营养物质,将可以满足全球三分之一的N需求和五分之一的P需求^[15]。但是目前国内对人尿资源化利用的研究较少,关于资源化利用技术的可行性和实际工程应用的难点尚不清晰。

本文以源分离尿液为研究对象,综述不同尿液资源化处理技术的研究进展,分析每种处理技术的处理原理及其在不同条件下回收尿液中营养成分的优劣势,以期在不同环境条件下的尿液资源化利用寻求合适的处理方法,进一步开发其回收利用价值。

1 人尿的成分

尿液的成分因人而异、因地区而异,这取决于人的饮食习惯、饮水量、体型、体育活动和环境因素等^[16]。据报道,大多数发展中国家的人类尿液中的N含量可能低于工业国家,因为素食饮食比工业国家的混合饮食含有更少的蛋白质^[17]。贮存后尿液的主要理化特性和化学成分见表1。从化学成分来看,人的尿液是一种富N的水溶液,其中尿素占尿中总N的

75%~90%^[18-19],同时含有少量的尿酸、氨基酸和其他物质^[20]。尿液中大部分N与尿素或氮肥一样,易于被作物吸收,其N利用效率相当于同类无机肥料的90%^[21]。人体尿液除含有大量的N、P、K外,还含有B、Cu、Zn、Mo、Fe、Co、Mn等微量元素^[22]。

表1 人尿液的主要理化性质及组成成分
Table 1 Physico-chemical properties and composition of human urine

参数 Parameter	数值 Value	参考文献 Reference
pH	8.8	[22]
	8.9~9.2	[17]
	8.9	[23]
	9.2	[24]
	9.0	[25]
电导率 EC/(mS·cm ⁻¹)	47.2	[24]
	22.6±6.3	[26]
化学需氧量 COD/(g·L ⁻¹)	5.5±0.2	[22]
	7.66±4.63	[26]
总氮 TN/(g·L ⁻¹)	3.48±0.13	[22]
	3.07±1.15	[17]
	2.702	[23]
	8.36	[24]
	4.5	[25]
氨氮 NH ₄ ⁺ -N/(g·L ⁻¹)	1.80±0.75	[22]
	1.117~1.726	[27]
	2.3~2.9	[28]
硝氮 NO ₃ ⁻ -N/(μg·L ⁻¹)	45	[27]
	10	[29]
总磷 TP/(g·L ⁻¹)	0.19±0.052	[22]
	0.02±0.004	[17]
	0.37	[23]
	2.03	[24]
	0.26	[25]
钾 K/(g·L ⁻¹)	0.6	[22]
	1.7±0.2	[17]
	0.314	[23]
	2	[24]
	0.87	[25]
钠 Na/(g·L ⁻¹)	0.69±0.03	[22]
	1.17±0.12	[17]
	2.34	[24]
	0.88	[25]
硼 B/(mg·L ⁻¹)	0.435~0.440	[27]
铜 Cu/(μg·L ⁻¹)	155	[27]
	1.3~10.8	[30]
锌 Zn/(μg·L ⁻¹)	70~110	[27]
	19~665	[30]
钼 Mo/(μg·L ⁻¹)	45	[30]
	2.4~14.0	[31]
铁 Fe/(mg·L ⁻¹)	0.165~0.205	[27]
钴 Co/(μg·L ⁻¹)	1.0~12.0	[27]
	0.27	[30]
锰 Mn/(μg·L ⁻¹)	0.062	[30]

2 人尿资源化处理技术的利用现状

2.1 农田利用

近年来,尿液的农业利用技术已被一些国家(主要是北欧和非洲)广泛用于作物的有效种植^[32]。人尿中病原体含量非常低,同时却含有大量植物生长所必需的主要营养物质,如N、P、K、Ca、S、Mg等,可补充或替代合成肥料用于作物生产^[21,33]。研究表明如果在20℃或更高的温度下储存2~6个月,尿液可以直接作为农业的液体肥料^[25,34]。尿液中90%~100%的N主要以尿素或铵盐的形式存在,尿液中的尿素/铵与人工肥料中的尿素/铵相似,并且已在施肥试验中得到证实,尿液中高浓度的N可使作物充分生长。近年来,许多研究者对人尿作为作物肥料进行了试验,并取得了一些进展。与合成肥料相比,用尿液作液体肥料可增加黄瓜、白菜和苋属植物的单产,表明尿液也可以为植物提供必需的营养^[35-37]。同时,随着对尿液研究的不断深入,尿液还田的好处不断被发现,农民对尿液还田的接受度也不断提高。瑞士的一项调查显示,有42%的农民愿意购买尿液衍生的肥料产品^[38]。美国大约有一半的三年级学生愿意用尿液进行实验^[39]。

为保证农田利用安全有效,尿液必须经过贮存处理之后再行还田。人尿的贮存过程也就是腐熟的过程,一是确保尿液中致病菌的无害化,二是通过腐熟过程分解有害的污染物^[27]。贮存尿中的N主要以氨态N的形式存在,以碳酸氢盐为主要阴离子。由于有机质逐渐分解,氨态N不断增加,且氨的挥发性大,很容易导致N素丢失,降低肥效^[40]。研究表明,贮存方法不当可导致N损失高达60%~90%^[41]。因此收集后的尿液必须加盖密封保存,以防止N素损失。另外,对于特殊人群的尿液,如长期服用治疗心血管疾病或癫痫病药物人群的尿液^[42-43],必须经过其他特殊

处理后方可进行利用。因为这类人群服用的药物大多是通过尿液(部分是通过粪便)以未改变的原化合物或代谢物形式排出^[44-46],无法通过简单的贮存处理进行分解,这类尿液的施用将导致药物残留,造成有害成分在农田累积的风险^[47]。

2.2 N回收

在水环境中,N是一种主要的污染物,N浓度过高会导致水体富营养化,引发藻类大量繁殖、鱼类死亡等问题^[48]。N污染在我国也很普遍。据报道,自20世纪80年代中期以来,我国大部分省份水体的N含量已超过地表水水质标准临界值($1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以N计)。目前全国N的年排放量约 $(14.5\pm 3.1)\times 10^6\text{ t}$,城市污水排放量占总排放量的21%以上^[49]。人类尿液是城市污水中最大的营养物来源。在生活废水中,大约80%的N、50%的P和90%的K来自于人尿^[50]。人尿混入生活污水一同排入污水处理厂,将增加污水的N负荷,而为获得更高的脱N效率,污水处理厂的建设成本和运行成本将随之增加^[51-52]。因此,从源分离的尿液中回收N,用作固体/液体肥料,可以减少污水处理厂污水中N的负荷,为污水高效处理提供了一个有前景的解决方法^[53]。N回收的主要技术及特点见表2。

2.2.1 离子交换技术

离子交换(Ion exchange, IE)技术原理是在尿液贮存过程中将以尿素形式存在的N水解成铵(NH_4^+),保留在离子交换吸附剂带负电荷的位置上。载有 NH_4^+ 的阳离子交换吸附剂可以直接用作固体肥料(当吸附剂为天然来源时)或再生用于生产液态肥料和可重复使用的吸附剂^[54]。斜发沸石是一种天然的对铵具有高亲和力的离子交换剂,聚合大分子交换剂同样适用^[60]。研究表明,与直接排入污水处理厂的处置方式相比,通过离子交换处理尿液的成本要低40%,而且用尿液生产硫酸铵的成本远低于商业肥料的市场成本^[54]。离子交换技术的适用范围很广,从单个洗手间或家庭

表2 人尿液氮回收技术

Table 2 Nitrogen recovery technology for human urine

技术 Technology	特点 Feature	回收率 Recovery rate	参考文献 Reference
离子交换 Ion exchange	成本低、指标测定简单便宜、能生产出一种比商品肥成本更低的土壤添加剂	—	[54]
膜蒸馏 Membrane distillation	减轻了膜蒸馏系统中的膜污染	—	[55]
正向渗透 Forward osmosis	收益高、减少下游处理厂养分负荷	50%	[56]
吹脱法 Vacuum stripping	能实现高铵态氮废水处理和农业生产的双重目的	80%	[57]
微生物燃料电池 Microbial fuel cell	技术新颖、操作简单	$3.29\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ (以N计)	[58]
电化学 Electrochemistry	工艺简洁、操作简单	$57\%\pm 0.5\%$	[59]

规模到集中式尿液收集站均适用。

2.2.2 膜蒸馏技术

膜蒸馏(Membrane distillation, MD)是一种热驱动的分选过程,驱动力是疏水膜两端的温差引起的蒸汽压力差。该技术应用范围较广,如脱盐、废水处理和食品工业^[61]。MD也是一种有效的浓缩尿液的脱水工艺,它比蒸发过程所需要的能量更少,而与反渗透过程相比,其膜污染的风险更低^[55]。此外,如果利用工厂产生的废热或太阳能热源,MD工艺的成本可以降至更低。在MD系统中,蒸汽分子可以通过疏水性微孔膜,而非挥发性物质从理论上完全被截留^[62]。MD工艺通过脱水来浓缩进料侧的氨和硝酸盐成分。但是,源分离人尿的高氨浓度和碱性条件增加了高挥发性游离氨含量,且随之导致大量的游离氨通过渗透MD膜的疏水性微孔进行转移。因此,MD工艺的应用也仅仅限于基于膜的氨吹脱(在渗透侧浓缩 NH_4^+),用以从高浓度氨废水(如源分离的人类尿液或猪粪)中回收氨^[63-65]。

2.2.3 正向渗透技术

正向渗透(Forward osmosis, FO)是一种依靠半透膜分开的两种溶液之间的渗透压差驱动水分子传输的过程。由于溶质无法通过膜进行扩散,因此低浓度溶液中的水会流向高浓度溶液并将其稀释,直到达到热力学平衡为止^[66]。另外,当肥料用作高浓度溶液时,称为肥料驱动正向渗透,最终的稀释溶液可直接用于灌溉^[56]。由于正向渗透中水分子是通过扩散而不是对流进行传输,所以正渗透膜比反渗透膜更抗污染,但该技术的主要缺点是离子在高浓度溶液中会反

向扩散到低浓度溶液中,即产生反向盐通量(Reverse salt flux, RSF)。这是由于所用的正向渗透膜为非理想型,即离子排斥不是100%^[56]。

2.2.4 吹脱法

吹脱法 (Vacuum stripping, VS) 是一种物理化学处理工艺, 在此工艺中, 液体混合物与空气接触, 通过液相到气相的传质作用去除挥发性组分^[67]。吹脱法回收源分离尿液中的氨也得到了广泛研究。LIU 等^[68]采用改进的双膜模型评估吹脱法回收源分离尿液中的氨, 结果表明, 提高空气流速和温度可以降低单元操作成本, 而高 pH 值会导致化学物质投入增加而使单元操作成本升高。TIAN 等^[57]采用真空热吹脱与酸吸收相结合的预处理工艺从水解尿液中以硫酸铵的形式回收氨, 结果表明, 在 60 ℃、21.3 kPa 且不调节 pH 值的条件下, 3 h 批次吹脱实验从水解尿液中回收 80% N 获得的最大氨传质系数为 17.6 mm·h⁻¹, 相应的 N 回收负荷率为 36 kg·m⁻³·d⁻¹ (以 N 计)。该技术的经济评估结果表明, 从 1 m³ 尿液中回收/去除营养物质可以获得 2.01 元的利润。

2.2.5 微生物燃料电池技术

微生物燃料电池 (Microbial fuel cell, MFC) 是一项应用广泛的新兴技术^[69]。在尿液铵盐回收过程中, 用 MFC 作为气体扩散阴极, 铵离子的迁移和氨气的扩散导致铵离子向阴极传输。在阴极室中, 铵离子因高 pH 值被转化成氨气, 随后在气-液临界点通过挥发被酸液吸收 (图 1)。KUNTKE 等^[58]的研究指出, 在电流 $0.50 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 的条件下, 铵盐的回收率为 $3.29 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (以 N 计)。研究表明, MFC 回收铵比传统氨吹脱

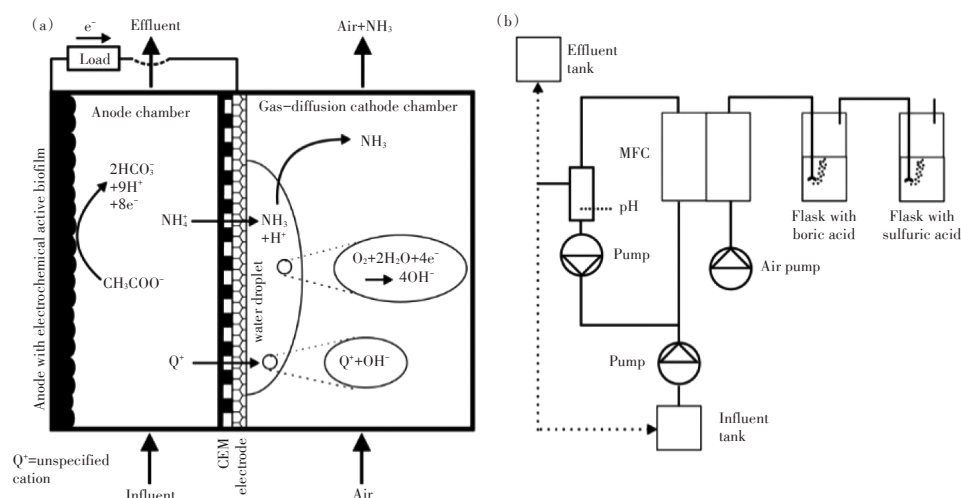
图 1 微生物燃料电池技术回收铵的实验装置示意图^[58]

Figure 1 Schematic diagram of the experimental device for recovering ammonium by microbial fuel cell technology

更有优势。通过MFC回收铵过程中曝气所需要的能量更少^[70]。MFC反应可以产生能量且不需添加CaO(或NaOH),而氨吹脱必须添加这类物质。但是MFC回收铵有一点不足,其产生的电子只有31%用于铵的运输,这限制了可以传输的铵的总量^[58]。

2.2.6 电化学技术

电化学(Electrochemistry, EC)技术的原理是通过提供足够高的电流使水在阳极氧化(产生氧气和质子),在阴极还原(产生氢气和羟基),最终形成没有缓冲区的酸性阳极和碱性阴极。该电流驱动阳离子从阳极向阴极以电迁移的形式穿过阳离子交换膜(Cation exchange membrane, CEM)。因此, NH_4^+ 可以从阳极转移至阴极,在高pH环境中容易转化为 NH_3 (随 H_2 一起),便于用气流将其吹脱。持续不断地去除氨使得从阳极流出的铵离子流量恒定,因为穿过膜的氨氮浓度梯度保持不变。然后,吹脱气体通过一个酸阱或其他仅能捕获 NH_3 的方式(如冷凝),并浓缩为高纯度铵产品^[59]。LUTHER等^[59]采用EC处理尿液并结合氨吹脱和硫酸吸收形成 $(\text{NH}_4)_2\text{HSO}_4$ 并计算氨回收率,结果表明, TN的回收率达到 $57\% \pm 0.5\%$ 。电化学提取法从含高浓度氨的复杂废水中回收氨是一种很有前景的技术,但目前还处于实验室研究阶段,在处理源分离尿液方面还需要进一步研究。

2.3 P回收

P是所有生物体必需的营养物质,对人类社会的发展至关重要。随着全球人口的增长和寿命的延长,人们需要更多的食物,而种植作物所需要的P肥及其主要依赖的P矿储量正在迅速减少^[71]。相反,目前人类社会中以不可持续的P流动模式通过人类垃圾向环境排放了过量的P,导致了全球范围内的水体富营养化。为了保障粮食安全、维持社会可持续性发展,我们必须回收目前在人类活动循环中所丢失的P^[72]。许多学者已经开展了从各种废弃物中回收P的研究,如食物链废物(如农作物再利用)中的残渣、食物垃圾和人类垃圾(粪便和尿液)^[73-74],而尿液被认为是最有前景的一个选择^[75]。回收和再循环P不仅节省有限的P资源,而且减少富营养化的发生,进一步减少对

水环境和人类健康的危害^[76]。广泛的研究和实际应用表明,随着现代粪尿分集厕所和无水小便器的应用,从分离尿液中回收P的可能性显著提升^[77]。P回收的主要技术及特点见表3。

2.3.1 鸟粪石沉淀技术

在P回收技术中,鸟粪石($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)沉淀是一种可行且最常用的方法,鸟粪石沉淀过程可回收约99%的P^[78]。其中鸟粪石是由可溶性正磷酸盐(PO_4^{3-})、铵(NH_4^+)、镁(Mg^{2+})按摩尔比1:1:1进行化学反应沉淀而成^[71]。鸟粪石还是一种不含微污染物的固体缓释肥料,可以从尿液中产生。这种生态肥料可以补充或部分替代传统化肥,以满足现代农业对P的需求^[81]。然而,由于鸟粪石沉淀反应必须用镁来诱导,而金属镁价格比较昂贵,因此该沉淀反应成本很高。近年来,廉价的替代沉淀剂,如卤水、草木灰和预处理菱镁矿等已被报道,但它们的可用性差、沉淀效率低和易产生污染等缺点限制了其推广应用^[82]。

2.3.2 海水和反渗透盐水沉淀技术

目前研究较多的离子沉淀回收源分离尿液中P的技术主要是海水和反渗透(RO)盐水沉淀技术^[79]。海水中含有大量的Mg离子,在沿海区域已被广泛用于P沉淀实验研究。在此类研究中,对于水解尿液,P在不同海水尿液比例下回收率均超过90%。但是由于运输距离较远,对于大多数地处内陆的城市来说可行性较差。

反渗过程中,反渗透膜在高压下运行产生含盐量低的滤液,同时将大多数矿物成分提炼至较小体积的浓缩废液中,即反渗透盐水。由于反渗透盐水中无机离子的含量很高,尤其是高价阳离子,因此有可能成为一种很有前景的除磷剂。TIAN等^[79]通过批次和连续流实验发现,在pH=9.0、反渗透盐水与尿液体积比为1:1的条件下,新鲜尿液和水解尿液中P的回收率均在90%以上。另外,反渗透盐水本身的处理就是一个难题,现有处理技术(如闪蒸等)能耗高,给火电厂带来巨大的成本负担^[83-84]。因此,反渗透盐水用于回收P不仅解决了其本身的处理难题,而且实现了资源化利用。

表3 人尿液磷回收技术

Table 3 Phosphorus recovery technology for human urine

技术 Technology	特点 Feature	回收率 Recovery rate	参考文献 Reference
鸟粪石沉淀 Struvite precipitation	回收率高,操作简单	99%	[78]
海水和反渗透盐水沉淀 Seawater and reverse osmosis brine precipitation	回收率高,沉淀剂来源广泛	>90%	[79]
吸附技术 Adsorption technology	回收率高,原材料可重复使用	>97.5%	[80]

2.3.3 吸附技术

吸附技术是通过选择性吸附剂将酸性或碱性条件下尿液中P进行回收的方法。有研究者采用聚合物-无机杂化阴离子交换(HAIX)树脂和天然黄土分别在pH=6和pH=9的条件下,对新鲜尿液和水解尿液进行吸附实验,发现这些吸附材料对尿液中P的吸附量较低(<10 mg),且几次吸附之后吸附剂的可重复利用性难以保证^[85-86]。GUAN等^[80]提出了一种用含水氧化钪包裹的磁性纳米颗粒($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZrO}_2$)组成的磁性材料从pH=4的酸化尿液中回收P的替代方法,这一技术包括易于分离和再生的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZrO}_2$ 对磷酸盐选择性吸附、磷酸盐的解析、解析的磷酸盐以磷酸钙形式沉淀等过程^[87]。吸附相对于沉淀的优势在于:①尿液中的其他成分会干扰沉淀过程,而吸附过程基本不受干扰。以磷酸镁钾(MgKPO_4)的析出为例,铵根离子、钙离子和钠离子都会干扰沉淀的形成,因此应先去除铵根离子,并寻找一种替代的碱性化合物来调节pH,而不是直接用NaOH。但是,无论尿液中是否存在其他组分,吸附剂对P的选择性吸附都是可以实现的;②沉淀需要在适当的pH值条件下有正确的反应物配比,而吸附过程添加过量的吸附剂不会造成吸附剂材料的浪费,因为它可以被回收再利用。但是其缺点是吸附最终会达到饱和,之后吸附剂材料将不再发挥作用。在这方面,解吸被吸附的磷酸盐和再生的吸附剂进一步使用是必不可少的^[80]。

2.4 K回收

K是农业肥料中重要的营养补充物,主要来源于K矿,预计全球K需求量将从2019年的 3.95×10^5 t增加到2023年的 4.57×10^7 t^[88]。然而,全球K的主要供应国,如加拿大、俄罗斯和土库曼斯坦的供应量却难以满足市场的需求。因此,从源分离的尿液中提取K引起了广泛关注,特别是那些缺乏K矿的国家。此外,从尿液中回收K和其他营养物质还可以平衡处理城市污水所需的能量和成本^[89],大大增加了尿液资源化利用技术探索的价值。流化床结晶(FBC)工艺能够回收结晶或颗粒状固体物质^[90]。随着Ca或Mg的加入,P和K可以三元化合物 $[\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}, \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}, \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ 的形式被回收。沉淀效果越好,FBC工艺消耗的化学物质质量越少,同时通过形成低含水率的颗粒,避免了大量富水污泥的产生,而这些颗粒可以进一步作为缓释肥料用于农业和园艺^[91]。然而,FBC的结晶过程需要种子材料(如二氧化硅或氧化铝),种子材料是低含水率颗粒杂质

的主要来源。种子材料的添加也大大增加了K回收的成本,不利于实际的工程推广。

流化床均质结晶(FBHC)工艺是FBC工艺的改进型,在FBHC中不需要种子材料,在温和的过饱和条件下,细核团聚体的均质结晶可以得到高纯度的晶体颗粒。FBC和FBHC的结晶过程可分为均质结晶(有种子材料)或异质结晶(无种子材料)。异质结晶是指晶粒生长是通过将过饱和物质沉淀到杂质颗粒表面(通常是氧化硅或氧化铝)实现。相比之下,均质结晶没有杂质颗粒,晶粒通过在亚稳态溶液中原子核相互碰撞增大。造粒过程使充分流化的均相颗粒不断增大,即流化床均质结晶过程。FBHC可以将沉淀物转化为高纯度、低含水率的颗粒状物质^[91],最终可以用作农业和园艺缓释肥料。

2.5 提取生化药品

近年来,利用尿液提取制作生化药品的技术越来越受到关注,这是一项变废为宝、造福于人的举措。人尿中含有多种活性物质,如尿激酶、激肽释放酶、亲纤维蛋白尿激酶-抑制剂复合物、抗癌物质等^[92]。目前,在我国利用的尿液中,男性尿液主要用于提取尿激酶(UK),女性尿液主要用于提取绒毛膜促性腺激素(UCG)^[93]。尿激酶是一种能使纤维蛋白原活化并生成具有溶解性纤维蛋白能力的纤维蛋白溶解酶,适用于各种血栓病及心肌梗死等疾病的临床治疗。尿激酶可以从新鲜的健康男性尿液中经分离提纯制得^[94]。最近研究表明,尿激酶与抗癌药物并用,可以大大提高抗癌药物的疗效^[95-96]。目前从人尿中提取尿激酶的方法主要有吸附法、超滤法、离子交换法等,但以上方法均存在周期长、工艺过程复杂、耗能高、回收率低等问题^[97-98]。绒毛膜促性腺激素是一种存在于孕妇血液及尿液中的促性腺激素,其生物活性类似于促黄体生成激素,由胎盘滋养叶外层细胞合成^[99]。目前,从人尿中提取绒毛膜促性腺激素的方法主要有Got法改良工艺、高岭土吸附工艺等^[93],尿液中的许多生化药物具有特殊疗效,因此积极开发此资源不但可满足临床用药需求,且可出口创汇。

3 结论与展望

人尿中含有丰富的营养物质,目前源分离人尿的资源化利用技术主要包括农田利用技术、N回收技术、P回收技术、K回收技术及生化药品提取等技术,这些技术的应用可以减少因尿液直接排放所造成的水体富营养化、鱼类死亡等环境污染问题,同时还可

以回收尿液中的N、P、K等营养物质,实现资源再利用。国内外研究人员对源分离人尿资源化利用技术进行了大量的研究,虽然取得了一定的效果,但目前研究中仍存在问题,需要进一步深入探讨。今后,源分离人尿资源化利用技术研究还需从以下方面重点开展:

(1)我国作为人口大国,人尿资源丰富,蕴含着巨大的综合利用潜质。开展源分离人尿资源化利用技术研究并建立示范工程,不仅有利于农业的可持续发展,而且是防止厕所粪污污染、改善人居环境质量的重要措施。特别是在我国广阔的农村地区,将人尿有效地替代合成肥料,不但能够降低种植成本,还能改善环境质量。因此,人尿用作液体肥料很可能将是今后的趋势。

(2)N的资源化回收利用的主要技术都是物理工艺,因此需要借助外力从人尿中提取N,导致能量消耗巨大。今后N提取工艺可与发电厂的锅炉蒸汽相结合,这样既可以利用发电厂产生的额外势能从人尿中提取N,又可以节省N提取所消耗的其他资源。

(3)P的资源化回收利用主要为沉淀和吸附两种工艺。沉淀工艺操作简单,且可以直接生成鸟粪石,作为缓释肥料补充或替代部分化肥。但沉淀反应过程中需要添加镁来诱导反应,而金属镁价格昂贵。因此,研发低成本、易获得且P回收率高的替代沉淀剂将是该技术在工程推广应用需要突破的方向。

参考文献:

- [1] CHANEY R L. Food safety issues for mineral and organic fertilizers[J]. *Advances in Agronomy*, 2012, 117: 51–116.
- [2] BONGAARTS J. United Nations Department of Economic and Social Affairs, population division world family planning 2020: Highlights United Nations publications[J]. *Population and Development Review*, 2020, 46(4): 857–858.
- [3] BICER Y, DINCER I, VEZINA G, et al. Impact assessment and environmental evaluation of various ammonia production processes[J]. *Environmental Management*, 2017, 59(5): 1–14.
- [4] MOGOLLÓN J M, BEUSEN A H W, VAN GRINSVEN H J M, et al. Future agricultural phosphorus demand according to the shared socio-economic pathways[J]. *Global Environmental Change*, 2018, 50: 149–163.
- [5] REIJNDERS L. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2014, 93: 32–49.
- [6] US Geological Survey. Mineral commodity summaries[R]. Reston: US Geological Survey, 2014.
- [7] 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(5): 965–973.
- [8] DRANGERT J O. Fighting the urine blindness to provide more sanitation options[J]. *Water SA*, 1998, 24(2): 157–164.
- [9] 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.
- [10] LAHR R H, GOETSCH H E, HAIG S J, et al. Urine bacterial community convergence through fertilizer production: Storage, pasteurization, and struvite precipitation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(21): 11619–11626.
- [11] MAURER M, PRONK W, LARSEN T A. Treatment processes for source-separated urine[J]. *Water Research*, 2006, 40(17): 3151–3166.
- [12] LARSEN T A, HOFFMANN S, LUTHI C, et al. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world[J]. *Science*, 2016, 352(6288): 928–933.
- [13] LEDEZMA P, KUNTKE P, BUISMAN C J N, et al. Source-separated urine opens golden opportunities for microbial electrochemical technologies[J]. *Trends in Biotechnology*, 2015, 33(4): 214–220.
- [14] XU K, LIN F, DOU X, 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.
- [15] BONVIN C, ETTER B, UDERT K M, et al. Plant uptake of phosphorus and nitrogen recycled from synthetic source-separated urine[J]. *Journal of the Human Environment*, 2015, 44(2): 217–227.
- [16] PAUDEL P, SHRESTHA P, UPRETI H K. Effect of human urine as fertilizer on crop production[J]. *Agronomy Journal of Nepal*, 2011, 4(2): 168–172.
- [17] RANASINGHE E S S, KARUNARATHNE C L S M, Beneragama C K, et al. Human urine as a low cost and effective nitrogen fertilizer for bean production[J]. *Procedia Food Science*, 2016, 6: 279–282.
- [18] MCFARLANE I G. Geigy scientific tables: 8th edition[J]. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 1986, 79(8): 497.
- [19] KIRCHMANN H, PETERSSON S. Human urine—chemical composition and fertilizer use efficiency[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 40(2): 149–154.
- [20] MEDEIROS D L, QUEIROZ L M, COHIM E, et al. Human urine fertiliser in the Brazilian semi-arid: Environmental assessment and water-energy-nutrient nexus[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136–145.
- [21] JÖNSSON H, SALOMON E, VINNERÅS B, et al. Guidelines on the use of urine and faeces in crop production[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2004.
- [22] CHATTERJEE P, GRANATIER M, RAMASAMY P, et al. Microalgae grow on source separated human urine in Nordic climate: Outdoor pilot-scale cultivation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237(5): 119–127.
- [23] BONZI M, LOMPO F, KIBA I D, et al. A study of the agronomic effi-

- ciency of human stool and urine on production of maize and egg plant in Burkina Faso[M]//BATIONO A, WASWA B, OKEYO J M. Innovations as key to the green revolution in Africa. Netherlands: Springer, 2011:641–649.
- [24] PRADHAN S K, HOLOPAINEN J K, WEISELL J, et al. Human urine and wood ash as plant nutrients for red beet (*Beta vulgaris*) cultivation: Impacts on yield quality[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(3):2034–2039.
- [25] AKPAN-IDIOK A U, UDO I A, BRAIDE E I. The use of human urine as an organic fertilizer in the production of okra (*Abelmoschus esculentus*) in south eastern Nigeria[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 62:14–20.
- [26] 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.
- [27] KIRCHMANN H, PETTERSSON S. Human urine—chemical composition and fertilizer efficiency[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 40(2):149–154.
- [28] HEINONEN-TANSKI H, SJOBLÖM A, FABRITIUS H, et al. Pure human urine is a good fertilizer for cucumbers[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1):214–217.
- [29] PRADHAN S K, HOLOPAINEN J K, HEINONEN-TANSKI H. Stored human urine supplemented with wood ash as fertilizer in tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivation and its impacts on fruit yield and quality[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(16):7612–7617.
- [30] HEITLAND P, KÖSTER H D. Fast, simple and reliable routine determination of 23 elements in urine by ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2004, 19(12):1552–1558.
- [31] CAMPILLO N, VIÑAS P, LÓPEZ-GARCÍA I, et al. Determination of molybdenum, chromium and aluminium in human urine by electrothermal atomic absorption spectrometry using fast-programme methodology[J]. *Talanta*, 1999, 48(4):905–912.
- [32] PANDORF M, HOCHMUTH G, BOYER T H. Human urine as a fertilizer in the cultivation of snap beans (*Phaseolus vulgaris*) and turnips (*Brassica rapa*) [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2019, 67(1):50–62.
- [33] ESRAY S A. Towards a recycling society: Ecological sanitation—closing the loop to food security[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(4):177–187.
- [34] VINNERDS B, NORDIN A, NIWAGABA C, et al. Inactivation of bacteria and viruses in human urine depending on temperature and dilution rate[J]. *Water Research*, 2008, 42(15):4067–4074.
- [35] HEINONEN-TANSKI H, BLOM A, FABRITIUS H, et al. Pure human urine is a good fertilizer for cucumbers[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1):214–217.
- [36] PRADHAN S K, NERG A M, SJOBLÖM 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 & Food Chemistry*, 2007, 55(21):8657–8663.
- [37] ADEOLUWA O O, COFIE O. Urine as an alternative fertilizer in agriculture: Effects in amaranths (*Amaranthus caudatus*) production[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2012, 27(4):287–294.
- [38] LIENERT J, HALLER M, BERNER A, et al. How farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled anthropogenic nutrients (urine) [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(1):47–56.
- [39] LONG A. The uses of human urine and faeces in agriculture: Guidance for future experiments [EB/OL]. [2020-06-18]. <http://ceadserv1.nku.edu/longa/ClimateChange/vignettes/Footprints/HolyShitAndPee.pdf>.
- [40] 郭维垣. 人粪尿[J]. 新农业, 1984(15):26–27. GUO W Y. Human excrement[J]. *New Agriculture*, 1984(15):26–27.
- [41] 倪世俊. 夏季怎样保存人粪尿[J]. 新农业, 2004(7):44. NI S J. How to save human feces and urine in summer[J]. *New Agriculture*, 2004(7):44.
- [42] DROBOT G R, KARLOWSKY J A, HOBAN D J, et al. Antibiotic activity in microbiological media versus that in human urine: Comparison of ampicillin, ciprofloxacin, and trimethoprim-sulfamethoxazole [J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1996, 40(1):237–240.
- [43] WINKER M, CLEMENS J, REICH M, et al. Ryegrass uptake of carbamazepine and ibuprofen applied by urine fertilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(8):1902–1908.
- [44] JJEMBA P K. Excretion and ecotoxicity of pharmaceutical and personal care product in the environment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 63(1):113–130.
- [45] JONES O A H, GREEN P G, VOULVOULIS N, et al. Questioning the excessive use of advanced treatment to remove organic micropollutants from wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(14):5085–5089.
- [46] KÜMMERER K. The presence of pharmaceuticals in the environment due to human use: Present knowledge and future challenges[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2354–2366.
- [47] LIENERT J, GÜDEL K, ESCHER B. Screening method for ecotoxicological hazard assessment of 42 pharmaceuticals considering human metabolism and excretory routes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(12):4471–4478.
- [48] BLAAS H, KROEZE C. Excessive nitrogen and phosphorus in European rivers: 2000–2050[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67:328–337.
- [49] YU C, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749):516–520.
- [50] LARSEN T A, PETERS I, ALDER A, et al. Re-engineering the toilet for sustainable wastewater management[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(9):192A–197A.
- [51] GUPTA V K, ALI I, SALEH T A, et al. Chemical treatment technologies for wastewater recycling: An overview[J]. *RSC Advances*, 2012, 2(16):6380–6388.
- [52] 王佳伟, 张天柱, 陈吉宁. 污水处理COD和氨氮总量削减的成本模型[J]. 中国环境科学, 2009, 29(4):443–448. WANG J W, ZHANG T Z, CHEN J N. Cost model for reducing total COD and ammonia nitrogen loads in wastewater treatment plants[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(4):443–448.

- [53] JIMENEZ J, BOTT C, LOVE N, et al. Source separation of urine as an alternative solution to nutrient management in biological nutrient removal treatment plants[J]. *Water Environmental & Research*, 2015, 87:2120–2129.
- [54] TARPEH W A, ILEANA W, MICHAEL O O, et al. Evaluating ion exchange for nitrogen recovery from source-separated urine in Nairobi, Kenya[J]. *Development Engineering*, 2018, 3:188–195.
- [55] 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.
- [56] VOLPIN F, HEO H, HASAN JOHIR M A, et al. Techno-economic feasibility of recovering phosphorus, nitrogen and water from diluted human urine via forward osmosis[J]. *Water Research*, 2019, 150:47–55.
- [57] 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(5):965–973.
- [58] KUNTKE P, SMIECH K M, BRUNING H, et al. Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell[J]. *Water Research*, 2012, 46(8):2627–2636.
- [59] 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(12):367–377.
- [60] JORGENSEN T C, WEATHERLEY L R. Ammonia removal from wastewater by ion exchange in the presence of organic contaminants[J]. *Water Research*, 2003, 37(8):1723–1728.
- [61] ALKHUHIRI A, DARWISH N, HILAL N. Membrane distillation: A comprehensive review[J]. *Desalination*, 2012, 287:2–18.
- [62] CATH T Y, ADAMS D, CHILDRESS A E. Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space: II. Combined direct osmosis, osmotic distillation, and membrane distillation for treatment of metabolic wastewater[J]. *Journal of Membrane and Science*, 2005, 257:111–119.
- [63] ZAREBSKA A, CHRISTENSEN K V, NORDDAHL B, et al. The application of membrane contactors for ammonia recovery from pig slurry[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 44:1642–1645.
- [64] ZAREBSKA A, NIETO D R, CHRISTENSEN K V, et al. Ammonia recovery from agricultural wastes by membrane distillation: Fouling characterization and mechanism[J]. *Water Research*, 2014, 56(1):1–10.
- [65] QU D, SUN D, WANG H, et al. Experimental study of ammonia removal from water by modified direct contact membrane distillation[J]. *Desalination*, 2013, 326:135–140.
- [66] PHUNTSO S, SHON H K, MAJEED T, et al. Blended fertilizers as draw solutions for fertilizer-drawn forward osmosis desalination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(8):4567–4575.
- [67] SEADER J D, HENLEY E J, ROPER D K, et al. Separation process principles: Chemical and biochemical operations[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [68] 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.
- [69] HAMELERS H V M, HEIJNE A T, SLEUTELS T H J A, et al. New applications and performance of bioelectrochemical systems[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(6):1673–1685.
- [70] MAURER M, SCHWEGLER P, LARSEN T A, et al. Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(1):37–46.
- [71] LI P Y, CHEN L P, DING Y S, et al. Phosphorus recovery from urine using cooling water system effluent as a precipitant[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244(8):391–398.
- [72] ASHLEY K, CORDELL D, MAVINIC D, et al. A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse[J]. *Chemosphere*, 2011, 84:737–746.
- [73] PRATHUMCHAI N, POLPRASERT C, ENGLANDE A J, et al. Phosphorus distribution and loss in the livestock sector: The case of Thailand[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 136:257–266.
- [74] THITANUWAT B, POLPRASERT C, ENGLANDE J A, et al. Quantification of phosphorus flows throughout the consumption system of Bangkok Metropolis, Thailand[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542:1106–1116.
- [75] DAI J, TANG W T, ZHENG Y S, et al. An exploratory study on seawater-catalyzed urine phosphorus recovery (SUPR)[J]. *Water Research*, 2014, 66:75–84.
- [76] STOKAL M, YANG H, ZHANG Y, et al. Increasing eutrophication in the coastal seas of China from 1970 to 2050[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 85(1):123–140.
- [77] HANAEUS J, HELLSTROM D, JOHANSSON E, et al. A study of a urine separation system in an ecological village in northern Sweden[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(9):153–160.
- [78] PRADHAN S K, MIKOLA A, VAHALA R, et al. Recovery of nitrogen and phosphorus from human urine using membrane and precipitation process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 247:596–602.
- [79] TIAN X, WANG G, GUAN D, et al. Reverse osmosis brine for phosphorus recovery from source separated urine[J]. *Chemosphere*, 2016, 165(12):202–210.
- [80] GUAN T, KUANG Y, LI X D, et al. The recovery of phosphorus from source-separated urine by repeatedly usable magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZrO}_2$ nanoparticles under acidic conditions[J]. *Environment International*, 2020, 134:105322.
- [81] AGUADO D, BARAT R, BOUZAS A, et al. P-recovery in a pilot-scale struvite crystallisation reactor for source separated urine systems using seawater and magnesium chloride as magnesium sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 672:88–96.
- [82] PINATHA Y, POLPRASERT C, ENGLANDE A J. Product and cost perspectives of phosphorus recovery from human urine using solid waste ash and sea salt addition: A case of Thailand[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713:136514.
- [83] ALHAZMY M M. Economic and thermal feasibility of multi stage

- flash desalination plant with brine-feed mixing and cooling[J]. *Energy*, 2014, 76(11):1029-1035.
- [84] MORILLO J, USERO J, ROSADO D, et al. Comparative study of brine management technologies for desalination plants[J]. *Desalination*, 2014, 336:32-49.
- [85] O'NEAL J A, BOYER T H. Phosphate recovery using hybrid anion exchange: Applications to source-separated urine and combined wastewater streams[J]. *Water Research*, 2013, 47(14):5003-5017.
- [86] JIANG S, WANG X, YANG S, et al. Characteristics of simultaneous ammonium and phosphate adsorption from hydrolysis urine onto natural loess[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(3):2628-2639.
- [87] WANG Z, XING M C, FANG W K, et al. One-step synthesis of magnetite core/zirconia shell nanocomposite for high efficiency removal of phosphate from water[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 366:67-77.
- [88] GARSIDE M. Forecast of potash fertilizer demand worldwide 2014—2023[R]. International Fertilizer Industry Association, 2019.
- [89] MAYER B K, BAKER L A, BOYER T H, et al. Total value of phosphorus recovery[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13):6606-6620.
- [90] GUEVARA H P R, BALLESTEROS F C, VILANDO A C, et al. Recovery of oxalate from bauxite wastewater using fluidized-bed homogeneous granulation process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 154(6):130-138.
- [91] LE V G, VU C T, SHIH Y J, et al. Phosphorus and potassium recovery from human urine using a fluidized bed homogeneous crystallization (FBHC) process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 384:123282.
- [92] 王友同, 吴文俊. 生化药物进展及前瞻[J]. 中国药学杂志, 1991, 26(6):323-328. WANG Y T, WU W J. Progress and prospects of biochemical drugs[J]. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 1991, 26(6):323-328.
- [93] 宋愿智. 尿的开发与综合利用[J]. 中国生化药物杂志, 1992(1):71-74. SONG Y Z. Urinary development and comprehensive utilization[J]. *Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics*, 1992(1):71-74.
- [94] 李岩. 从人尿中提取尿激酶的新方法[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(3):43-45. LI Y. A new method of extract urokinase from human urine[J]. *Food and Fermentation Technology*, 2013, 49(3):43-45.
- [95] ERDOĞAN S, ÖZER A Y, BILGILI H. In vivo behaviour of vesicular urokinase[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2005, 295(1/2):1-6.
- [96] DRAPKIN R, CLAUS A, SKATES S. Urokinase-type plasminogen activator receptor: A beacon of malignancy[J]. *Clinical Cancer Research*, 2008, 14(18):5643-5645.
- [97] 刘自力. 尿激酶的制作方法[J]. 生意通, 2008(8):75-76. LIU Z L. How to make urokinase[J]. *Business Link*, 2008(8):75-76.
- [98] HORSTMANN B J, CAMERON A P, KENNEY C N, et al. Use of macroreticular resins for the adsorption of urokinase from human urine[J]. *Biotechnology Letters*, 1985, 7(5):307-312.
- [99] 张景海, 刘素梅. 人绒毛膜促性腺激素的结构和活性关系研究[J]. 沈阳药学院学报, 1989, 6(3):188-190, 198. ZHANG J H, LIU S M. Research on the relationship between structure and activity of human chorionic gonadotropin[J]. *Journal of Shenyang Pharmaceutical University*, 1989, 6(3):188-190, 198.