



基于还田视角的人粪尿处理研究进展

李天昕, 翁锐, 徐新朋, 程世昆, 杨联, 李勇, 李子富

引用本文:

李天昕, 翁锐, 徐新朋, 程世昆, 杨联, 李勇, 李子富. 基于还田视角的人粪尿处理研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(6): 1388–1399.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0652>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田下的主要产地环境问题及其绿色防控技术

苏瑶, 杨艳华, 贾生强, 喻曼, 陈喜靖, 沈阿林

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 711–717 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0128>

我国蔬菜废弃物资源化利用技术分析及展望

刘佳豪, 姚昕, 翟胜, 孙树臣, 杨伟鹏, 魏蓉, 陈锦秀, 丁新惠, 田晓飞

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 636–644 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0267>

玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响

张莉, 李玉义, 逢焕成, 王婧, 丛萍, 张珺瞳, 郭建军

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 160–168 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0137>

基于减排潜力与减排成本的水稻种植模式综合评价 ——以湖北省为例

周杏, 李晶, 于书霞, 刘微, 胡荣桂

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 568–575 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0115>

秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响

倪中应, 沈倩, 章明奎

农业资源与环境学报. 2017, 34(3): 215–225 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0305>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李天昕, 翁锐, 徐新朋, 等. 基于还田视角的人粪尿处理研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1388–1399.

LI T X, WENG R, XU X P, et al. Research progress regarding human feces and urine treatments from the perspective of return-to-field applications[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1388–1399.

基于还田视角的人粪尿处理研究进展

李天昕¹, 翁锐¹, 徐新朋², 程世昆^{1*}, 杨朕³, 李勇¹, 李子富¹

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京市工业典型污染物资源化处理重点实验室, 北京 100083; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 南京师范大学化学与材料科学学院, 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210023)

摘要:人粪尿中含有丰富的有机物和N、P、K等矿物质营养物质, 还田利用不仅可有效降低污水处理系统污染负荷, 而且可代替部分化肥, 促进绿色农业的发展。然而人粪尿直接还田存在环境风险, 且尚未形成标准化处理模式。本文基于还田视角, 归纳总结了国内外人粪尿还田技术的应用现状, 结合人粪尿的特性, 阐述了人粪尿主要处理技术的还田效应以及安全性, 并且对各种技术进行了安全评估和比较。结果表明, 厌氧消化、好氧堆肥技术在无标准规范下处理人粪不能保证还田的安全性, 制备生物炭基肥还田具有安全可靠、减少农业碳排放等环境效益, 水热炭化技术处理含水率较高的人粪具有独特的优势。尿液经储存还田仍存在微污染物风险, 鸟粪石沉淀技术具有很好替代潜力, 其他技术均停留在微污染物去除和营养物质回收的研究阶段。本文提出了人粪尿还田面临的问题和挑战, 以及未来的研究方向, 以期为人粪尿还田技术的合理选择和标准化、规范化研究提供参考。

关键词:人粪尿; 还田; 绿色农业; 堆肥; 生物炭; 水热炭化; 鸟粪石沉淀

中图分类号: X70

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)06-1388-12

doi: 10.13254/j.jare.2022.0652

Research progress regarding human feces and urine treatments from the perspective of return-to-field applications

LI Tianxin¹, WENG Rui¹, XU Xinpeng², CHENG Shikun^{1*}, YANG Zhen³, LI Yong¹, LI Zifu¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Beijing Key Laboratory of Resource-oriented Treatment of Industrial Pollutants, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. School of Chemistry and Materials Science, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Human feces and urine are rich in organic matter and mineral nutrients such as N, P, and K. Applying these in the field not only reduces the pollution load of sewage treatment systems, but also replaces some fertilizers to promotes the development of green agriculture. However, the direct application of human feces and urine in agriculture has environmental risks and has not yet formed a standardized treatment model. From the perspective of applying feces and urine to the field, this study presents a summary of the current situation locally and internationally. Considering the characteristics of human feces and urine, the effectiveness and safety of the main waste treatment technologies are expounded, and the safety of various technologies is evaluated and compared in this study. The results show that anaerobic digestion and aerobic composting technology cannot guarantee the safety of applying human feces in the field without standard specifications. The preparation of biochar-based fertilizer has environmental benefits such as improved safety, reliability, and the reduction of agricultural carbon emissions, and hydrothermal carbonization technology has unique advantages in treating human feces with high moisture content. There is still a risk of micro-pollutants in urine applied to the field after storage; while struvite precipitation technology

收稿日期: 2022-09-19 录用日期: 2022-10-10

作者简介: 李天昕(1975—), 女, 吉林辉南人, 教授, 博士生导师, 研究方向为农村厕所粪污资源化利用与管理模式评价。E-mail: tianxinli@ustb.edu.cn

*通信作者: 程世昆 E-mail: chengshikun@ustb.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1903206); 中央高校基础科研业务费专项(FRF-AT-20-03)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFC1903206); Fundamental Research Funds for the Central Universities(FRF-AT-20-03)

has good replacement potential, other technologies are still in the research stage regarding micro-pollutant removal and nutrient recovery. The problems and challenges as well as future research directions are proposed, and this study provides a reference for the reasonable selection, standardization, and normalization of the human feces and urine reuse technology.

Keywords: human feces and urine; return-to-field; green agriculture; composting; biochar; hydrothermal carbonization; struvite precipitation

人粪尿的不当处置会带来环境恶臭和水体污染的问题,同时增加环境中有害病原体的暴露风险^[1]。据世界卫生组织报道,2020年全球仍有23亿人缺乏基本卫生服务,46%的人口粪尿未能得到安全管理^[2]。在下水道等基础设施完善的国家和地区,人粪尿通常和其他污水混合排放进入污水处理系统,但这种模式处理成本高且导致资源浪费^[3]。在大多数发展中国家,则是采用基于现场卫生设施的多样化且低成本的收集处理模式,但因缺乏有效的管理,人粪尿处理和利用率低。在集中排水管网没有覆盖的地区,仍存在粪便收集和处量大、资源化利用水平低等问题。

过量施用化肥给环境带来巨大压力,如矿石资源枯竭、增加碳排放^[4],以及重金属富集、面源污染^[5]等问题,严重影响了粮食安全和农业可持续发展。人粪尿是重要的有机肥源,富含N、P、K等营养元素及有机质^[6]。据估算,我国人粪尿资源若被完全利用,其相当于同期化肥消费量的24.53%(N、P、K含量分别相当于同时期化肥消费量的28.09%、18.32%和25.53%)^[7],具有很大的化肥替代潜力。随着农村“厕所革命”的推进,人粪尿资源化处理将成为关注的热点。鉴于此,本文综述了人粪尿还田前的主要处理技术,对技术的适用性、安全性及还田效应进行了述评分析,以期为人粪尿的资源化还田利用提供借鉴。

1 人粪尿的特征

1.1 人粪尿的产量及主要成分

影响人粪尿生成率和特征的因素主要有个人膳

食结构、年龄结构、饮水量以及其他环境情况^[8]。人粪包括分集粪便和粪污,成年人平均每日产生的粪便和粪污相当于1.65 g TN、0.36 g TP、0.51 g TK、30.01 g COD有机污染物,同时含有大量致病微生物和少量重金属及抗生素。尿液主要由水、各种无机盐、有机化合物和其他代谢废物(药物和激素等微污染物)组成,成年人平均每日产生尿液相当于7.50 g TN、0.85 g TP、2.36 g TK、24.00 g COD有机污染物,分别约占人类排泄物的82%、70%、82%、44%^[9]。

1.2 人粪尿的特征

受不同地区现场卫生设施类型,及其设计、建造和维护管理的影响,人粪的特征显著不同^[10]。来自公共厕所等大型卫生设施的粪污通常比小型卫生设施的粪污、分集粪便的稳定性更差,COD等有机物污染物含量更高^[11-12]。人粪中营养物质多以复杂有机质的形式存在,无法被农作物直接吸收利用^[13]。尿液中的N元素主要以尿素的形式存在,P、K元素分别以磷酸盐和钾离子的形式存在,均为利于农作物吸收利用的形态^[9]。分集粪便和尿液中N、P、K和有机质含量差异显著,如图1所示。

2 人粪处理还田

为保证人粪还田安全性,需对其进行稳定化、无害化处理。目前,我国对人粪的处理还没有形成标准化、规范化和产业化的处理模式^[14]。人粪的固液分离是促进其高效处理和还田的关键,影响分离效果的主要因素包括人粪的物理形态以及固体、蛋白质和脂肪

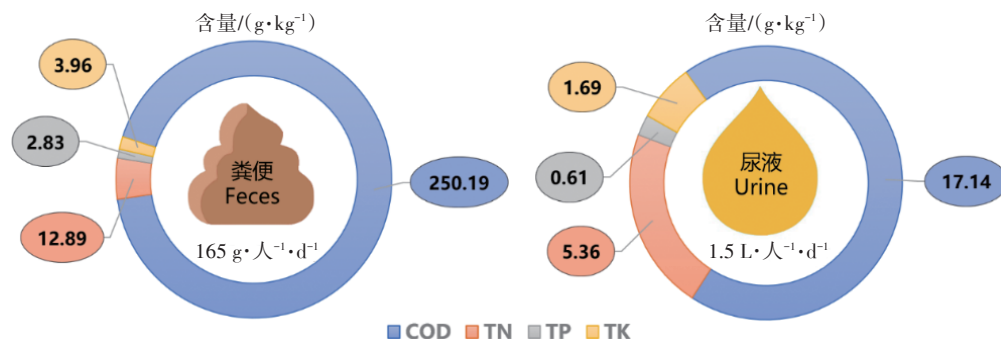


图1 人粪尿中典型营养物质和污染物的含量

Figure 1 Contents of typical nutrients and contaminants in human feces and urine

等的含量,分集粪便中固定性固体和挥发性固体含量低,需要添加化学调节剂来提高分离效果,其脱水技术更具有挑战性^[8]。固液分离技术的选择取决于土地面积、技术成本和分离效率。干燥床、絮凝沉淀等低成本技术对土地需求、环境影响较大,带式压滤、离心脱水技术则对运行能耗、操作条件和成本要求较高^[15-16],因此在使用高成本固液分离技术之前合理利用低成本技术进行处理,可以在降低成本情况下达到较好的固液分离效果。人粪经固液分离后可采取厌氧消化、好氧堆肥、制备生物炭基肥以及水热炭化等技术进行处理,以满足还田要求。表1为影响人粪处理的主要参数。

表1 影响人粪处理的主要参数
Table 1 The main parameters affecting the treatment of human feces

人粪 Human feces	参数 Parameter	数值 Value	参考文献 Reference
粪污	C/N	20.1(干质量)	[17]
		12.6	[18]
		10.8~12.7	[19]
	含水率	81.43%	[18]
		95%	[19]
分集粪便	C/N	7.1	[8]
		7.2	[20]
		7.4(干质量)	[21]
	含水率	74.6%	[8]
		80.4%	[20]

2.1 厌氧消化

分集粪便的C/N较低且灰分含量较高,为提高厌氧消化过程的稳定性,通常利用粪污和其他有机废物(如畜禽粪便、污水污泥^[22]、农业废弃物、餐厨垃圾^[23]等)混合发酵。杜静等^[21]研究发现,人粪与稻秸、尾菜、牛粪的混合比分别为3:1、3:1、1:1条件下,产气率比纯人粪厌氧发酵分别提升了78.50%、20.75%和18.84%。许智等^[24]将人粪尿、餐厨垃圾、稻秸按不同比例混合进行研究,在中温条件下湿质量比为5:1:3.49的累积产气量相比5:1:1.74以及不加入稻秸的情况下分别提升7.7%、40.15%。原因是人粪中灰渣含量较高,增加稻秸提高了基质中挥发性固体的含量^[25]。但人粪厌氧消化的温度达不到较好的消毒效果,污染指标和致病微生物达不到安全处置的要求^[21,24,26]。因此,需采取预处理技术对致病微生物进行处理,Yin等^[27]通过热预处理(70℃)的中温厌氧消化系统实现粪污安全回收利用,当粪污总固体含量为

1%、2%、4%、6%、8%、10%和12%时,病原体完全灭活时间分别为60、60、80、80、100、100 min和100 min,这为提升人粪厌氧消化无害化处理效果提供了重要的参考。

目前,国内外厌氧消化产品还田效应的研究较少。在我国,随着西南地区“沼改厕”的推行,户用沼气系统是目前人粪还田普遍的设施,但是规模效益不明显。今后该技术的发展方向:一是推动厌氧消化处理装置产业化、规模化发展,形成一定的标准规范;二是针对不同条件选择无害化预处理技术,加强对致病微生物的去除,提高肥料产品的肥效和安全性^[28];三是利用资源回收技术对厌氧消化液中营养物质进行回收^[29-30]。

2.2 好氧堆肥

人粪好氧堆肥的自加热过程可以对人粪中病原体进行消毒,是管理人粪的一种有前景的方法^[31],提高堆肥效率、减少病原体是其研究的热点。影响堆肥效率的主要因素包括微生物的活性、人粪的C/N(20~35)、含水率(50%~60%)、pH值(6.0~7.5)、颗粒大小以及曝气条件等^[12]。在保证原料不含对环境和人类健康有长期负面影响的污染物情况下,许多研究者将人粪与餐厨垃圾^[32]、城市固体废物^[33]、农业废弃物^[34]等进行共堆肥处理。温度是衡量好氧堆肥效率以及无害化程度的关键指标。传统堆肥具有堆肥温度低(50~70℃)、周期长(25~45 d,甚至更长)的缺点,学者利用超高温菌进行好氧堆肥发现,超高温状态(80℃左右为常态)的堆肥周期仅为10 d,相比传统堆肥时间缩短60%以上,极大提高人粪堆肥品质和无害化程度^[35],但超高温好氧堆肥中微生物的需氧量和能耗较大,在实际应用中需安装通气设备并进行能源输入,增加了额外成本。时红蕾等^[36]以原料配比为1:4的人粪、锯末进行了小规模家庭好氧堆肥研究,结果表明该方式可以有效减少N损失,肥料产品具有适宜的腐熟度和生理毒性。因此,为促进农村和缺水地区人粪源地处理还田利用,减少收集和运输成本,新型堆肥厕所的建设以及小型专业化堆肥设备的研发是农村人粪堆肥还田的合适选择。

人粪干燥是堆肥前预处理步骤之一,分集粪便的C/N通常比粪污低,且脱水技术具有挑战性,因此粪污适合作为好氧堆肥的原料。目前,应用堆肥技术处理人粪的主要限制包括:一是缺乏空间和资金对人粪进行干燥预处理,管理成本高,设备无法维护;二是高N损失以及气味问题;三是缺乏相关有机添加物的严

格标准^[37]。在未来,人粪好氧堆肥还田应加强预处理工艺的优化、超高温菌堆肥的研发以及小型专业化堆肥设备的普及。

2.3 制备生物炭基肥

制备生物炭基肥可保证100%病原体消除,生物炭基肥施用于土壤中有利于提高土壤持水以及阳离子交换能力,可显著改善土壤肥力,促进农作物生长^[17,38]。人粪制备生物炭基肥还田能实现人粪无害化、减量化和资源化目标,具有安全可靠、减少农业碳排放等优势。生物炭制备主要受工艺的热解温度、升温速率和热解时间的影响^[39]。白晓凤等^[18]结合单因素和正交优化试验研究制备生物炭的最优工艺条件,结果表明热解温度对产率的影响最显著,其次是升温速率、热解时间,在600℃、升温速率15℃·min⁻¹、热解时间70min的条件下,生物炭的产率高达49%,同时具有较大的比表面积和孔体积。刘璇^[40]的研究表明,热解温度500℃、热解时间60min条件下获取的生物炭具有较高的热稳定性及丰富的微孔结构,同时P、K含量较高,具有良好的土壤应用潜力。许多研究通过提高热解温度来提高生物炭的稳定性,丰富生物炭基肥P、K等有效营养成分,但也造成N元素、酸性官能团流失^[41]和低熔点灰分物质烧结、沉积^[20]以及重金属含量升高^[38]等问题。

目前,人粪作为原料制备生物炭基肥还田仍处于初步研究阶段,含水率、N含量较低的分集粪便更适合作为原料,以减少生产过程能耗和N损失。虽然国际生物炭倡议组织(IBC)为生物炭的生产标准制定指导方针,但不同热解工艺制备的生物炭存在明显的土壤影响效果^[38,41-42],因此,今后需加强不同热解工艺对生物炭基肥还田效应影响的相关研究,为其制备提供更准确的指导。在未来的实际应用中,应加强人粪制备生物炭基肥的生产成本以及碳减排相关研究,提高其还田的环境经济效益。

2.4 水热炭化

水热炭化(Hydrothermal Carbonization, HTC)技术可在较低温度、无需干燥预处理或其他添加剂条件下分解有机废弃物,该技术可以消除病原体,显著降低气味和可溶性有毒重金属的含量,HTC产品通过改善土壤持水能力、孔隙结构和提高养分含量促进作物生长^[43-44]。影响HTC过程的主要参数为反应温度、停留时间、底物pH和加热速率,低加热速率有利于提高水炭的炭化程度^[45],提高酸浓度、反应温度和停留时间,有利于人粪转化成稳定的肥料产品^[46]。

Wüst等^[46]研究HTC产品可以安全用作肥料时的最佳反应条件,结果表明pH=4、反应温度为220℃、停留时间为2h时水炭产率最高,同时N、P具有较高的保留率。McGaughy等^[43]通过研究HTC回收粪污中营养物质发现,水炭和炭液中P、N含量分别在100~130g·kg⁻¹、1.8~2.1g·L⁻¹之间,HTC反应条件影响营养物质的形态及其在水炭和炭液中的组成,但对总含量没有显著影响。人粪HTC产品中N:P:K比例与商品肥料相似^[47],但该技术可能对结构稳定的有机物分解不彻底,产品中的毒性物质易造成还田风险。

人粪作为HTC原料生产土壤改良剂的研究较少,该技术处理含水率较高的粪污具有独特的优势。目前,HTC生产水炭仅限于对纤维素、半纤维素、木质素等单一化学物质降解机理的研究^[45],因此需要通过进一步研究来阐明复杂有机质转化为水炭的机理。HTC研究主要集中在水炭方面,炭液生产和实际应用鲜有研究,未来应系统地研究人粪特征及其主要成分的含量对HTC过程的影响,根据HTC产品用途(土壤改良剂或液态肥料)进一步优化工艺流程和技术参数。

2.5 技术总结及对比

表2总结了人粪还田技术的主要特点、适合处理的人粪类型、潜在的环境和健康风险以及技术成熟度。根据技术的可操作性和肥料产品的安全性可以看出,虽然厌氧消化、好氧堆肥技术的理论与实践应用已广泛开展,但在没有标准规范下不能保证还田的安全性。人粪制备生物炭基肥还田具有固碳作用且稳定性和安全性高,水热炭化技术可在不对人粪进行预处理的情况下应用,但两种技术的反应过程和还田效应仍需进一步探讨。目前,许多研究者开展了乳酸发酵-堆肥技术^[54]、堆肥-蚯蚓堆肥一体化技术^[55]、生物炭-堆肥技术^[51,56]等多种协同处理技术研究,对于提高人粪处理效率及提升肥料产品的品质具有重要意义。

3 分集尿液处理还田

分集尿液还田过程中存在氨挥发以及产生高浓度盐、病原体和微污染物等风险,同时大量尿液收集和运输也是棘手的问题^[57-58]。根据国内外学者的研究,尿液还田前的处理方法主要有两类:一是减少尿液中的病原体和微污染物,主要技术包括尿液储存、电渗析、纳滤和高级氧化技术;二是浓缩和提取尿液中的营养物质,主要技术包括渗透技术、汽提法、鸟粪石沉淀法。

表2 人粪还田前处理技术对比

Table 2 Comparison of treatment technologies before returning human feces to the field

处理技术 Treatment technology	技术特点 Technical feature	适合处理的人类类型 Type of human feces suitable for treatment	潜在的环境和健康风险 Potential environmental and health risk	技术成熟度 Technical maturity	参考文献 Reference
厌氧消化	成本低,减少臭气; 处理耗时长,无害化程度低,不利于产生 经济效益	沼气池厕所、公用为主的大型 化粪池厕所、双瓮厕所粪污	积累NO ₃ 和HNO ₃ , 存在病原体、有机微污染物 与重金属	++++ ▲▲▲	[30,48-50]
好氧堆肥	粪污减量化和稳定化; 参数控制要求高,堆肥质量难保证	户用为主的小型化粪池厕所、 双瓮厕所粪污	高N损失,温室气体排放, 重金属富集	+++++ ▲▲▲▲	[31,35, 37,51]
制备生物 炭基肥	具有固碳作用,环境风险低,产品稳定性和 安全性高; 反应控制过程相对复杂	双坑交替厕所、粪尿分集厕所 中含水率较低的分集粪便	重金属含量较高,高N损失, 存在多环芳烃、二噁英和呋 喃等有机污染气体排放风险	+++ ▲▲▲▲▲	[38,41]
水热炭化	无需干燥预处理和其他添加剂,消除病原体;大型化粪池厕所、双瓮厕所中 对稳定的有机物分解不彻底	大型化粪池厕所、双瓮厕所中 含水率较高的粪污	HTC产品中存在的毒性物质 对土壤和作物造成不利影响	+++ ▲▲▲▲	[43,52,53]

注: + 代表处理技术的可操作性; ▲代表肥料产品的安全性。

Note: + represents the feasibility of treatment technology; ▲ represents the safety of fertilizer products.

3.1 尿液储存

尿液密封储存可以有效防止新鲜尿液中尿素的水解,降低N素流失,减少致病微生物。尿液还田可以改善土壤营养状况,增加萝卜^[59]、玉米^[60]、小白菜以及空心菜^[61]等农作物的产量,促进化肥减量。根据尿液的还田指南,尿液经密封储存处理后以1:3~1:5的稀释比进行稀释,可减少尿液中盐组分对土壤以及农作物的毒害风险^[62]。

影响尿液储存效果的主要参数为温度、pH值和储存时间。低温(4℃)储存通过降低酶和微生物的活性减少尿液水解^[63]。尿液储存前,在每升未稀释尿液中加入0.61 mmol 硫酸或1.00 mmol 醋酸进行酸化处理(pH约为4.0)^[64],或加入10 g Ca(OH)₂进行碱化处理(pH为11.0~13.0)^[65],均可有效抑制尿素的分解以及病原体的生存。Victor等^[66]报道,尿液在20℃下储存6个月后可以作为肥料施用,不会造成农作物食用部分病理性污染以及对土壤环境的负面影响。但尿液长期储存不能实现激素、残留药物等难降解微污染物的去除,作为食用农作物的生产肥料可能造成毒理学风险,易对敏感性人群(如婴儿)造成健康影响^[67]。由于缺乏对尿液还田的风险和收益认知,全球仅59%人口接受尿液作为农作物肥料,不同国家接受程度差异仍很大^[68],因此,需要对尿液进行消毒处理以及规范化利用。

3.2 电渗析技术

电渗析技术(Electrodialysis, ED)是利用离子交换膜在直流电场的作用下,将尿液中带电离子组分分离的电化学膜技术。表观分子量为100~200 Da的离子交换膜可以有效拦截药物和激素等大分子微污染

物,同时选择性地将营养物质提取到浓缩液中^[69]。Pronk等^[70]首次利用ED法去除尿液中的微污染物,研究表明,该方法对尿液中常见的5种微污染物(普萘洛尔、炔雌醇、布洛芬、双氯芬酸和卡马西平)最初去除率很高,然而随着操作时间(90 d)的延长会出现5%~10%渗透。Arola等^[71]证明ED法对微污染物截留率可达到92%,将NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P和K⁺等营养物质浓缩高达5倍。在处理尿液还田方面,瑞士水研究所(EAWAG)将ED法与臭氧氧化技术结合提高去除微污染物的稳定性,其生产的“Urevit”肥料产品的农艺价值高于其他被测有机肥料,且在适当的施用技术条件下,预期的施肥效率与硝酸铵化肥相当^[72]。目前利用ED法分离营养素和微污染物的相关报道较少,因此在生产浓缩养分用作肥料之前,必须评估其还田安全性,同时该方法需要消耗大量电能,处理尿液的经济性需进一步提高。

3.3 纳滤技术

纳滤技术(Nanofiltration, NF)是低压力(0.2~2 MPa)驱动运行的一种膜分离技术,可以实现分子量为200~500 Da的物质截留,该技术已被应用于截留杀虫剂、药物化合物、干扰性激素等与环境风险有关的化合物^[73]。NF对微污染物的截留效果取决于电荷和极性,带负电的NF膜对带负电荷的离子、微污染物具有较高的截留率,且效果随着pH值的增加而提升^[74-75]。Pronk等^[74]从制备尿基肥料的角度评估了不同NF膜去除微污染物和渗透养分的有效性,在pH=5条件下,截留分子量为300 Da的NF270纳滤膜对未水解尿液中常见的5种微污染物具有92%以上的截留率,大部分尿素和氨具有良好的渗透效果,但磷酸

盐和硫酸盐几乎完全被截留。其他学者也证明NF可有效实现单价离子与多价离子、有机物的分离^[76]。因此,NF应用于尿基肥料生产时可利用不同特性和孔径的NF膜选择性截留微污染物以及渗透营养素,或利用多组膜对尿液中不同价态的N、P进行分离。但该技术运行成本高、膜易受污染,且高度浓缩的微污染物的最终处置也是需要重视的问题。

3.4 高级氧化技术

高级氧化技术(Advanced Oxidation Process, AOPs)是利用强氧化剂将物质进行氧化,通过改变物质的化学结构消除其污染性,或将其污染性降低。很多研究基于臭氧、Fenton法、电化学氧化以及声化学氧化等AOPs对尿液中药物残留物、抗生素、细胞抑制剂和激素等微污染物进行降解^[77]。其中臭氧氧化法和UVC辐射法应用较成熟,降解效果取决于氧化剂量、尿液基质和操作方法等因素^[78]。单一的AOPs处理可能存在微污染物没有完全矿化、降解副产物具有生物活性以及形成有毒中间体等问题^[79-80]。因此学者通过联合Fe/H₂O₂的方式提高反应动力学^[81],或利用超声波氧化处理,减少尿液基质对微污染物去除的影响^[78-79]。此外,结合尿液特征的联合工艺处理可以减少N素的损失,同时显著减少能耗。Tettenborn等^[82]的研究表明,尿液中高浓度的氨氮与氧化剂或者羟基自由基进行反应,对尿液中微污染物的去除造成抑制作用,采用蒸汽汽提法减少氨氮后,臭氧投加量为2.5 g·L⁻¹或UVC辐射功率强度为2.5 kWh·L⁻¹时可以完全去除尿液中的药物残留物。AOPs作为一种重要的深度处理手段,为尿基肥料的生产提供安全保障,未来的研究应聚焦于可降低成本、减少尿液中营养物质损失、提高微污染物去除率的联合处理技术。

3.5 渗透技术

渗透技术包括反渗透(Reverse Osmosis, RO)和正渗透(Forward Osmosis, FO)。基于压力驱动的RO工艺对离子态盐类和微污染物具有较高的截留率,可以通过控制尿液pH值改变氨氮的存在形式,选择性截留或者渗透氨氮^[83]。FO是利用膜两侧溶液的渗透压差作为驱动力的低压膜工艺,可以选择性地从尿液中分离出低分子量中性化合物^[84-85]。在国内,刘乾亮等^[86]首次研究FO处理尿液,FO膜能有效截留尿液中的污染物,对TN和氨氮的截留率均在98.5%以上,清洗膜后膜通量可以恢复90%以上。目前,肥料驱动正向渗透的概念已被提出,利用高渗透压和扩散性的镁盐溶液作为吸取溶液,可以在不造成膜损伤情况下

使尿液体积减少60%,以生产鸟粪石的形式回收约50% N和40% P^[87]。为进一步提高尿液营养物质的浓缩以及连续性运行,学者将膜蒸馏(Membrane distillation, MD)工艺与FO结合。当尿液pH 6~7、2.5 mol·L⁻¹ NaCl作为吸取溶液时,FO-MD工艺可以截留尿液中的总有机碳、TN、磷酸盐以及病原微生物和有机污染物^[88]。FO具有低结垢、低能耗以及高稳定性的优点,是目前用于浓缩尿液中营养物质的不错选择,但其推广应用中仍存在诸多挑战,如浓缩尿液的消毒利用^[89]、渗透性FO膜的选择以及高效且易于再生吸取溶质的技术^[84]等。

3.6 汽提法

汽提法是利用尿液中氨在碱性条件下易挥发的特点,通过传质作用实现氨的气液相脱离,氨通过硫酸等酸性溶液吸收,形成富含铵的液态肥料。该技术包括空气汽提和蒸汽汽提,与空气汽提法相比,基于热分离过程的蒸汽汽提法温度高,保证了高效率的氨传质,具有更好的可操作性和经济性^[90]。Liu等^[91]在空气流速14 L·min⁻¹·L⁻¹、温度323 K和运行时间2.2 h的操作条件下,从每立方米尿液(pH=9.3)中去除80%氨的最低运行成本为21.65美元,提高空气流速和温度有利于氨的脱离和降低单位运行成本,改变尿液稀释比对脱氨效率没有显著的影响,而pH值大于10时,额外的化学品投入导致单位运行成本增加。Hazard等^[92]研究了蒸汽汽提工艺回收氨的效果以及能量需求,结果表明,尿液与蒸汽相对流速比在6.5~7.5之间时氨回收率超过90%,且比Haber-Bosch工艺生产氮肥所需的能量更具有优势。在实际工程中,蒸汽汽提工艺不适合处理小规模尿液,需进一步降低工艺设备的能耗,以及利用太阳能或其他低品位热源降低温度控制成本^[82]。尿液中的铵含量比磷酸盐高,通过改变工艺参数控制反应器底物中铵的最终浓度,最后结合鸟粪石沉淀技术生产磷酸铵镁,可以最大限度地回收尿液中的N、P,该技术具有潜在的工业价值。

3.7 鸟粪石沉淀技术

鸟粪石沉淀技术是通过添加镁盐等沉淀剂从尿液中提取钾-鸟粪石或铵-鸟粪石晶体,作为农业和园艺用途的缓释肥料。该技术具有营养物质损失少,运输方便和安全可靠等优点,可将超过98%的微污染物保留在原尿液中,极大提高肥料产品的安全性^[93]。鸟粪石沉淀效率主要取决于镁盐的投加量和溶解度^[94]。Zamora等^[95]采用流化床工艺规模化生产铵-鸟粪石,在pH=8.6、Mg:P(摩尔比)=1.2条件下,N

和P的回收率分别为16%和94%，鸟粪石产品具有较高纯度和良好的颗粒结构。Le等^[96]开发利用流化床均相结晶工艺回收尿液中磷酸盐和钾，在操作参数为pH=10、Mg:K(摩尔比)=1.25、尿液上流速度30 m·h⁻¹时可以回收98.4% P和70.5% K，生成的钾-鸟粪石产品纯度高、含水率低，具有很好的还田应用前景。鸟粪石带来的P吸收量和作物产量不低于商业肥料，但其在碱性土壤中溶解度低、营养物质释放缓慢，会造成土壤结构变化以及农作物产量低等问题^[97-98]。因此还田前需加强当地土壤酸碱度对其释放速率的研究，并结合农作物的生长速率特点进行合理利用。另外，该方法需要额外的可溶性镁盐诱导沉淀反应，建立反应器成本高，今后需进一步开发成本低、沉淀效率高且环境效益高的替代沉淀剂^[99]。

3.8 技术总结和对比

尿液主要处理技术及特点见表3，单一的技术不能安全有效地将尿液中N、P、K回收，因此多种技术组合处理是未来研究的重点。FO-MD膜组合技术能耗低、膜污染小，可以进一步提高微污染物的截留率以及运行连续性，在尿液中营养物质的浓缩方面具有很好的应用前景。汽提法-鸟粪石沉淀技术组合可以同时生产硫酸氨液态肥料和鸟粪石，实现尿液中多种营养物质回收。随着生物炭吸附技术的发展，未来可以探究人粪制备的生物炭作为各种尿液营养物质回收技术的后续处理，评估其对N、P、K吸附的综合性能，加强回收尿液中营养物质作为增值肥料的相关研究。

4 人粪尿还田安全性研究

人粪尿还田的安全性是决定其还田利用的一个重

要因素，人粪尿中含有多种致病微生物以及少量微污染物、重金属和抗生素污染物，在农业中使用未经充分处理的人粪尿会造成健康风险。由于缺乏相关还田技术规范 and 标准，人粪尿-食物传播也会成为传染病的重要传播途径，还田时应充分评估其环境安全性。

4.1 病原体微生物

健康人群的尿液中致病微生物含量极少，但由于与粪便存在交叉感染，尿液中发现了血吸虫、伤寒沙门氏菌、问号钩端螺旋体和蠕虫卵等病原体^[102]。高温处理是去除人粪尿中病原体的有效途径。Sabar等^[103]研究证明了交叉组装噬菌体可以作为粪便污染和水环境中粪便致病微生物的有效监测指标，因此，尿液还田前可以通过测定该指标含量来判断尿液受粪便污染的程度，进而依据污染程度选择合适的处理技术。

4.2 微污染物

用于治疗人类疾病的激素以及药物用量增加，会导致人体代谢过程中形成内分泌干扰物的概率增加，从而增加尿液中微污染物的含量，尿液未经处理可能造成还田风险，引起人类脑损伤、糖尿病和癌症等多种疾病^[104]。目前，针对尿液中微污染物的处理标准和还田限值要求的相关研究较少，未来需加强微污染物在土壤中的积累与降解、对土壤理化性质影响以及潜在的生态毒理效应等研究。

4.3 重金属和抗生素

蔡佳盛等^[105]评价了我国农村节水型、水冲型公厕粪便处理还田时重金属和抗生素的潜在生态风险，粪污发酵产品中Cd、Cr、Cu、Zn重金属含量均大幅度超出《肥料中有毒有害物质的限量要求》(GB 38400—

表3 尿液处理技术特点

Table 3 Features of urine treatment technology

处理技术 Treatment technology	功能 Function	潜在的问题 Potential problem	成熟度 ^[58,100] Maturity	污染物分离率 Pollutant separation rate	能源需求 ^[82,101] Energy requirement
尿液储存	降低N素损失、减少病原体	存在未降解激素和残留药物微量污染物	++++	—	—
电渗析技术	截留微污染物	成本高、能耗高	++++	90%~95%	++++
纳滤技术	截留微污染物、选择性渗透营养素	成本高、膜污染以及高度浓缩微污染物的处理	+++	92%以上	++
高级氧化技术	去除病原体、微污染物	N素损失、能耗高	++	99%	+++++
汽提法	提取N素，制备硫酸氨液态肥料	能耗高、化学密集型	++	90%以上	++++
鸟粪石沉淀	提取P素，生产固态肥料	成本高、引起土壤结构变化	+++++	98%	+++
RO工艺	浓缩营养素或截留微污染物、渗透氨氮	能耗高、膜污染或结垢问题	++	43%~64%	++++
FO-MD工艺	浓缩营养素	吸取溶液以及高度浓缩液中微污染物的处理	+++	—	+++

注：+代表处理技术的可操作性；—代表不具有分离效果；-代表不需要能耗。

Note: + represents the feasibility of treatment technology; — represents no separation effect; - represents no energy consumption.

2019)和《有机肥料》(NY/T 525—2021)规定的指标要求,水冲型厕所的粪污发酵产品还田的重金属和抗生素风险较高。由于我国缺少人粪尿还田相关标准,表4对比了《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)等3项标准,结果表明分集粪便中的主要重金属含量均符合限值要求。图2展示了农业土壤中重金属主要来源,包括大气沉降、污水污泥、化肥和牲畜粪便等,可以看出加强人粪尿与农业系统的结合,可以有效减少污水灌溉和化肥施用带来的重金属污染问题,降低对环境和人类健康造成的风险。

5 结论与展望

本文在还田视角下重点分析人粪尿还田前主要处理技术的适用性、安全性以及还田后的效应。其中人粪还田前处理技术主要有厌氧消化、好氧堆肥、制备生物炭基肥以及水热炭化等。目前,由于各种技术存在局限性且缺乏相关标准的指导,多种技术协同处理研究已经开展,实现了产品的农艺价值和安全性提高。尿液是一种富含N、P、K营养物质的液态肥料。传统的尿液储存不能去除难降解微污染物,生产尿基肥料是其最佳处理途径,但基于膜处理的电渗析技术、纳滤技术以及渗透技术存在原尿液微污染物最终处置问题,汽提法、鸟粪石沉淀法能耗、运营成本高,在实际工程应用中经济效益不明显。面对“碳减排”和粮食安全生产的机遇与挑战,建议人粪尿还田的研究和工作重点应围绕三个方向开展:

表4 分集粪便中常见重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 Content of common heavy metals in feces(mg·kg⁻¹)

Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	参考文献或标准 Reference or standard
<12.5	<12.5	21.7		<12.5	<12.5	188.8	[17]
0.221		6.71		4.92	4.43	43.99	[8]
<0.5	11±5	46±9	0.08±0.05	9±3	17±9	338±86	[40]
	2.03	57.93		5.03	0.79	294.12	[106]*
		85				500	GB/T 25246—2010
3	150		2	600	50		GB 38400—2019
3	150		2		50		NY/T 525—2021

注:*根据粪便每日产生量29g(干质量)计算。

Note:*Based on fecal production of 29g(dry weight) per day.

(1)构建人粪尿管理-农业生产-消费者的营养物质循环模式。下水道系统的普及限制了人粪尿的还田利用,在循环经济的背景下,我国对人粪尿资源化的重视程度仍不够,考虑到土壤质量下降、肥料生产成本提高以及粮食安全问题,未来应探究以促进农业生产为目标的人粪尿管理模式,加强研究人粪尿高效收集、运输以及空间优化利用,提高人粪尿与农业系统的结合,促进营养物质闭循环。

(2)加快相关还田技术标准的制定。人粪尿还田存在健康风险,我国目前尚缺乏关于人粪还田的相关技术规范和标准,限制了主要处理技术的应用和推广。因此,未来应探究我国不同地区人粪尿特征,为加快制定集中式厌氧消化、好氧堆肥等技术规范及标

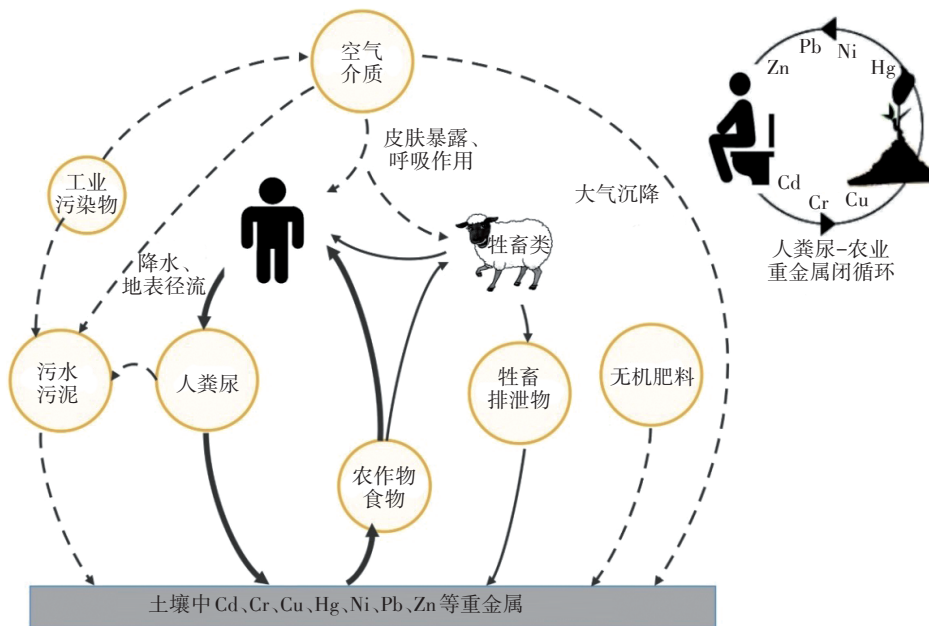


图2 农业土壤中重金属循环示意图

Figure 2 Schematic diagram of heavy metal cycle in agriculture soil

准提供依据,推动我国人粪还田标准化、规范化和产业化运营。

(3)加强分集尿液微污染物的深度处理以及处理技术的组合。诸多微污染物通过尿液排出,尿液还田或营养物质回收前需进行污染评估和深度处理。高级氧化技术是有效的深度处理技术,但直接处理尿液会造成氨氮的损失,未来应探究高级氧化技术作为其他尿液处理技术的后续处理方法的可行性,同时还需加强尿液中微量污染物的定量分析,为技术的选择和控制范围的确定提供理论支持。在实际工程应用中,应考虑不同技术的功能和特点,依据尿液的N、P、K含量特征以及去除污染物的类型调控组合技术种类和反应条件,以最大化地利用尿液资源的价值。

参考文献:

- [1] CHENG S, LI Z, UDDIN S M N, et al. Toilet revolution in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 216:347-356.
- [2] World Health Organization (WHO), United Nations Children's Fund (UNICEF). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000—2020: five years into the SDGs[R]. Geneva: WHO, UNICEF, 2021.
- [3] WALD C. The urine revolution: how recycling pee could help to save the world[J]. *Nature*, 2022, 602(7896):202-206.
- [4] 叶宗达, 田蕙, 甘昉, 等. 广西南宁市县域化肥施用碳足迹及其减排潜力[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(5):1142-1150. YE Z D, TIAN H, GAN F, et al. Carbon footprint and emission reduction potential of chemical fertilizer application at county scale in Nanning, Guangxi[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(5):1142-1150.
- [5] 肖阳. 农业绿色发展背景下我国化肥减量增效研究——以河南省为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. XIAO Y. Reduction and efficiency of chemical fertilizer under the background of agricultural green development in China: an empirical study of Henan Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [6] KRAUSE A, ROTTER V S. Recycling improves soil fertility management in smallholdings in Tanzania[J]. *Agriculture*, 2018, 8(3):31.
- [7] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. LIU X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [8] ROSE C, PARKER A, JEFFERSON B, et al. The characterization of feces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(17):1827-1879.
- [9] 赵畅. 典型农村厕所粪污肥效特性及利用对策[D]. 重庆: 重庆大学, 2020. ZHAO C. Characteristics of fertilizer effect and its utilization in typical rural toilets[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [10] SELEMAN A, GABRIELSSON S, KIMWAGA R. Faecal sludge containment characteristics and their implications on safe desludging in unplanned settlements of Dar es Salaam, Tanzania[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295:112924.
- [11] WANDA C, KENGNE E S, WAFO G V D, et al. Quantification and characterisation of faecal sludge from on-site sanitation systems prior the design of a treatment plant in Bangangte, west Region of Cameroon [J]. *Environmental Challenges*, 2021, 5:100236.
- [12] NIKIEMA J, COFIE O O. Technological options for safe resource recovery from fecal sludge[R]. CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE), International Water Management Institute (IWMI), 2014.
- [13] WINKER M, VINNÉRÅS B, MUSKOLUS A, et al. Fertiliser products from new sanitation systems: their potential values and risks[J]. *Biore-source Technology*, 2009, 100(18):4090-4096.
- [14] 张辉, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农村厕所改造及粪污处理标准体系研究[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(23):209-214. ZHANG H, ZHAO L X, MENG H B, et al. Study on the standard system for rural toilet construction and excrement disposal in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(23):209-214.
- [15] SHUKLA A, PATWA A, PARDE D, et al. A review on generation, characterization, containment, transport and treatment of fecal sludge and septage with resource recovery-oriented sanitation[J]. *Environmental Research*, 2023, 216:114389.
- [16] SINGH S, MOHAN R R, RATHI S, et al. Technology options for faecal sludge management in developing countries: benefits and revenue from reuse[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2017, 7:203-218.
- [17] BLEULER M, GOLD M, STRANDE L, et al. Pyrolysis of dry toilet substrate as a means of nutrient recycling in agricultural systems: potential risks and benefits[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12(7):4171-4183.
- [18] 白晓凤, 张耀中, 李子富, 等. 人粪生物炭的制备及性能分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(3):570-577. BAI X F, ZHANG Y Z, LI Z F, et al. Preparation and properties analysis of biochars derived from human feces[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(3):570-577.
- [19] FAKKAWEW K, KOOTTATEP T, POLPRASERT C. Faecal sludge treatment and utilization by hydrothermal carbonization[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 216:421-426.
- [20] LIU X, LI Z, ZHANG Y, et al. Characterization of human manure-derived biochar and energy-balance analysis of slow pyrolysis process [J]. *Waste Management*, 2014, 34(9):1619-1626.
- [21] 杜静, 沈礼晨, 奚永兰, 等. 人粪与不同废弃物混合厌氧发酵的效果[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(12):2644-2648. DU J, SHEN L C, XI Y L, et al. Effects of mixed fermentation of human fecal and different waste[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(12):2644-2648.
- [22] BURKA M S, BASAMYKINA A N, KHARLAMOVA M D. Technological features of biogas production while anaerobic co-digestion of faecal sludge, sewage sludge and livestock[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 666(4):042052.
- [23] KILUCHA M, CHENG S, MINZA S, et al. Insights into the anaerobic biogas digestion of fecal sludge and food waste in Tanzania[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10:1294.

- [24] 许智,叶小梅,常志州,等. 稻秸、餐厨垃圾及人粪尿混合厌氧发酵[J]. 环境工程学报, 2012, 6(7):2447-2453. XU Z, YE X M, CHANG Z Z, et al. Co-digestion of rice straw, kitchen waste and toilet waste for biogas production[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(7):2447-2453.
- [25] AFIFAH U, PRIADI C R. Biogas potential from anaerobic co-digestion of faecal sludge with food waste and garden waste[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1826(1):020032.
- [26] CHANGARA M C, SANYIKA W T, BANGIRA C, et al. Physico-chemical properties and bacterial community structure dynamics during the mesophilic anaerobic digestion of pit latrine faecal sludge[J]. *Water SA*, 2019, 45(3):338-348.
- [27] YIN F, LI Z, WANG D, et al. Performance of thermal pretreatment and mesophilic fermentation system on pathogen inactivation and biogas production of faecal sludge: initial laboratory results[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 151:171-177.
- [28] 尹福斌. 人粪便厌氧处理工艺优化和沼气贮气膜气密性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015. YIN F B. Study on anaerobic digestion process optimization of faecal sludge and membrane methane gas permeability[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [29] 罗雨莉,潘艺蓉,马嘉欣,等. 污水再生与增值利用的碳排放研究进展[J]. 环境工程, 2022, 40(6):83-91, 187. LUO Y L, PAN Y R, MA J X, et al. Research advances on carbon emission of wastewater resource recovery and valorization[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(6):83-91, 187.
- [30] VANECKHAUTE C, LEBUF V, MICHELS E, et al. Nutrient recovery from digestate: systematic technology review and product classification[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, 8(1):21-40.
- [31] HU M, FAN B, WANG H, et al. Constructing the ecological sanitation: a review on technology and methods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125:1-21.
- [32] ODEY E A, ABO B O, LI Z, et al. Application of lactic acid derived from food waste on pathogen inactivation in fecal sludge: a review on the alternative use of food waste[J]. *Reviews on Environmental Health*, 2018, 33(4):423-431.
- [33] ALAMIN M, BARI Q H. Extent of degradation in three stage co-composting of faecal sludge and solid waste[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2022, 72(8):914-924.
- [34] TRAN T, LE H, KIEU N T T, et al. Study on septic sludge utilization to coordinate with agricultural wastes to produce compost fertilizer[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 991(1):012089.
- [35] 张羽鑫,刘闯,黄殿男,等. 超高温菌好氧堆肥技术对人粪便的处理效果[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(4):179-185. ZHANG Y X, LIU C, HUANG D N, et al. Treatment effect of ultra-high temperature bacteria aerobic composting technology on human feces[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(4):179-185.
- [36] 时红蕾,王晓昌,李倩. 家庭小规模好氧堆肥中人粪便处理效果评价[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(10):87-92. SHI H L, WANG X C, LI Q. Evaluation of small scale composting of human feces based on household application[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(10):87-92.
- [37] ODEY E A, LI Z, ZHOU X, et al. Fecal sludge management in developing urban centers: a review on the collection, treatment, and composting[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30):23441-23452.
- [38] NUAGAH M B, BOAKYE P, ODURO-KWARTENG S, et al. Valorization of faecal and sewage sludge via pyrolysis for application as crop organic fertilizer[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020, 151:104903.
- [39] BASU P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory[M]. Burlington: Academic Press, 2018.
- [40] 刘璇. 热解技术用于人粪污泥资源化处理的研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015. LIU X. Study on the pyrolysis and resource recovery technology of human fecal sludge[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [41] KRUEGER B C, FOWLER G D, TEMPLETON M R, et al. Resource recovery and biochar characteristics from full-scale faecal sludge treatment and co-treatment with agricultural waste[J]. *Water Research*, 2020, 169:115253.
- [42] ILANGO A, LEFEBVRE O. Characterizing properties of biochar produced from simulated human feces and its potential applications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(2):734-742.
- [43] MCGAUGHY K, REZA M T. Recovery of macro and micro-nutrients by hydrothermal carbonization of septage[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(8):1854-1862.
- [44] QIAN T T, JIANG H. Migration of phosphorus in sewage sludge during different thermal treatment processes[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2014, 2(6):1411-1419.
- [45] WANG T, ZHAI Y, ZHU Y, et al. A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: process conditions, fundamentals, and physicochemical properties[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90:223-247.
- [46] WÜST D, CORREA C R, SUWELACK K U, et al. Hydrothermal carbonization of dry toilet residues as an added-value strategy: investigation of process parameters[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 234:537-545.
- [47] SPITZER R Y, MAU V, GROSS A. Using hydrothermal carbonization for sustainable treatment and reuse of human excreta[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205:955-963.
- [48] ANDREEV N, RONTELTA M, BOINCEAN B, et al. Lactic acid fermentation of human excreta for agricultural application[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206:890-900.
- [49] MONFET E, AUBRY G, RAMIREZ A A. Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology[J]. *Biofuels*, 2018, 9(2):247-262.
- [50] BUTKOVSKYI A, NI G, LEAL L H, et al. Mitigation of micropollutants for black water application in agriculture via composting of anaerobic sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 303:41-47.
- [51] AGYARKO-MINTAH E, COWIE A, SINGH B P, et al. Biochar increases nitrogen retention and lowers greenhouse gas emissions when added to composting poultry litter[J]. *Waste Management*, 2017, 61:138-149.
- [52] SAHA N, MCGAUGHY K, DAVIS S C, et al. Assessing hydrothermal carbonization as sustainable home sewage management for rural coun-

- ties: a case study from Appalachian Ohio[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146648.
- [53] 刘志鹏, 徐昊, 陈康, 等. 高湿固体废弃物水热炭化处理技术及产物还田的生态环境效应研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(5): 1001-1018. LIU Z P, XU H, CHEN K, et al. Advances in hydrothermal carbonization of high-moisture solid waste and ecological and environmental impacts of field application of the products[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2022, 45(5): 1001-1018.
- [54] ANDREEV N, RONTELTAP M, BOINCEAN B, et al. Treatment of source-separated human feces via lactic acid fermentation combined with thermophilic composting[J]. *Compost Science & Utilization*, 2017, 25(4): 220-230.
- [55] YADAV K D, TARE V, AHAMMED M M. Integrated composting-vermicomposting process for stabilization of human faecal slurry[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 24-29.
- [56] GODLEWSKA P, SCHMIDT H P, OK Y S, et al. Biochar for composting improvement and contaminants reduction: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 246: 193-202.
- [57] 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 G Q, ZHANG D D, ZHANG C X, 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.
- [58] MARTIN T M P, ESCULIER F, LEVAVASSEUR F, et al. Human urine-based fertilizers: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(6): 890-936.
- [59] 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 and Food Chemistry*, 2018, 67(1): 50-62.
- [60] KASSA K, ALI Y, ZEWDIE W. Human urine as a source of nutrients for maize and its impacts on soil quality at Arba Minch, Ethiopia[J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2018, 8(4): 516-521.
- [61] 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 H Y. Efficiency of urine hydrolysis pretreatment with its effect evaluation and risk analysis for vegetable cultivation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [62] RICHERT A, GENSCHE R, JÖNSSON H, et al. Practical guidance on the use of urine in crop production[R]. EcoSanRes Series. Stockholm: Stockholm Environment Institute (SEI), 2010.
- [63] 田时雨, 崩兴宇, 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(2): 66-72. TIAN S Y, KUAI X Y, HUANG T, et al. The property of urine in collection and storage process for resource utilization of urine[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(2): 66-72.
- [64] HELLSTRÖM D, JOHANSSON E, GRENBERG K. Storage of human urine: acidification as a method to inhibit decomposition of urea [J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(3/4): 253-269.
- [65] RANDALL D G, KRÄHENBÜHL M, KÖPPING I, et al. A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition[J]. *Water Research*, 2016, 95: 361-369.
- [66] VICTOR R, KOTTER R, O'BRIEN G, et al. WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater[J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2008, 65(1): 157-176.
- [67] MONETTI J, NIERADZIK L, FREGUIA S, et al. Urea hydrolysis and long-term storage of source-separated urine for reuse as fertiliser is insufficient for the removal of anthropogenic micropollutants[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118891.
- [68] SIMHA P, BARTON M A, PEREZ-MERCADO L F, et al. Willingness among food consumers to recycle human urine as crop fertiliser: evidence from a multinational survey[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 144438.
- [69] KIM D H, MOON S H, CHO J. Investigation of the adsorption and transport of natural organic matter (NOM) in ion-exchange membranes[J]. *Desalination*, 2003, 151(1): 11-20.
- [70] PRONK W, BIEBOW M, BOLLER M. Electrodialysis for recovering salts from a urine solution containing micropollutants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(7): 2414-2420.
- [71] AROLA K, WARD A, MÄNTTÄRI M, et al. Transport of pharmaceuticals during electrodialysis treatment of wastewater[J]. *Water Research*, 2019, 161: 496-504.
- [72] PRONK W, ZULEEG S, LIENERT J, et al. Pilot experiments with electrodialysis and ozonation for the production of a fertiliser from urine[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(5): 219-227.
- [73] WANG S, LI L, YU S, et al. A review of advances in EDCs and PhACs removal by nanofiltration: mechanisms, impact factors and the influence of organic matter[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 406: 126722.
- [74] 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.
- [75] ESCHER B I, PRONK W, SUTER M J-F, et al. Monitoring the removal efficiency of pharmaceuticals and hormones in different treatment processes of source-separated urine with bioassays[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(16): 5095-5101.
- [76] WANG J, WEI Y. Recovery of monovalent mineral salts from urine in controlled ecological life support system by nanofiltration: feasibility study[J]. *Desalination*, 2020, 479: 114344.
- [77] KRISHNAN R Y, MANIKANDAN S, SUBBAIYA R, et al. Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: a review[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101757.
- [78] SERNA-GALVIS E A, GUATEQUE-LONDOÑO J F, SILVA-AGREDO J, et al. Superior selectivity of high-frequency ultrasound toward chorine containing-pharmaceuticals elimination in urine: a comparative study with other oxidation processes through the elucidation of the degradation pathways[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 80: 105814.
- [79] GUATEQUE-LONDOÑO J F, SERNA-GALVIS E A, ÁVILA-TORRES Y, et al. Degradation of losartan in fresh urine by sonochemical and photochemical advanced oxidation processes[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3398.
- [80] MIKLOS D B, REMY C, JEKEL M, et al. Evaluation of advanced oxi-

- ation processes for water and wastewater treatment: a critical review [J]. *Water Research*, 2018, 139: 118–131.
- [81] GIANNAKIS S, ANDROULAKI B, COMNINELLIS C, et al. Wastewater and urine treatment by UVC-based advanced oxidation processes: implications from the interactions of bacteria, viruses, and chemical contaminants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 343: 270–282.
- [82] TETTENBORN F, BEHRENDT J, OTTERPOHL R, et al. Resource recovery and removal of pharmaceutical residues: treatment of separate collected urine[M]. Hamburg: Institute of Wastewater Management and Water Protection, Hamburg University of Technology, 2007.
- [83] RAY H, PERREAULT F, BOYER T H. Rejection of nitrogen species in real fresh and hydrolyzed human urine by reverse osmosis and nanofiltration[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(4): 103993.
- [84] RAY H, PERREAULT F, BOYER T H. Urea recovery from fresh human urine by forward osmosis and membrane distillation(FO-MD)[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, 5(11): 1993–2003.
- [85] RAY H, PERREAULT F, BOYER T H. Ammonia recovery from hydrolyzed human urine by forward osmosis with acidified draw solution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(18): 11556–11565.
- [86] 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(9): 16–19. LIU Q L, LIU C H, MA J, et al. Efficiency and operation performance of forward osmosis membrane in source-separated urine treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(9): 16–19.
- [87] VOLPIN F, CHEKLI L, PHUNTSHO S, et al. Simultaneous phosphorous and nitrogen recovery from source-separated urine: a novel application for fertiliser drawn forward osmosis[J]. *Chemosphere*, 2018, 203: 482–489.
- [88] 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.
- [89] LIU Q, LIU C, ZHAO L, et al. Integrated forward osmosis-membrane distillation process for human urine treatment[J]. *Water Research*, 2016, 91: 45–54.
- [90] TOTH A J, MIZSEY P. Comparison of air and steam stripping: removal of organic halogen compounds from process wastewaters[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(4): 1321–1330.
- [91] 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.
- [92] HAZARD J M, BISCHEL H N, LEVERENZ H L. Performance characterization of a steam distillation process for ammonium recovery from urine[J]. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2020, 6(1): 04019010.
- [93] NAGY J, MIKOLA A, PRADHAN S K, et al. The utilization of struvite produced from human urine in agriculture as a natural fertilizer: a review[J]. *Periodica Polytechnica: Chemical Engineering*, 2019, 63(3): 478–484.
- [94] LI B, HUANG H M, BOIARKINA I, et al. Phosphorus recovery through struvite crystallisation: recent developments in the understanding of operational factors[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 248: 109254.
- [95] ZAMORA P, GEORGIEVA T, SALCEDO I, et al. Long-term operation of a pilot-scale reactor for phosphorus recovery as struvite from source-separated urine[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2017, 92(5): 1035–1045.
- [96] 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.
- [97] LIU X, TAO Y, WEN G, et al. Influence of soil and irrigation water pH on the availability of phosphorus in struvite derived from urine through a greenhouse pot experiment[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(17): 3324–3329.
- [98] DEGRYSE F, BAIRD R, DA SILVA R C, et al. Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers: effect of soil pH, granulation and base excess[J]. *Plant and Soil*, 2017, 410(1/2): 139–152.
- [99] 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.
- [100] MAURER M, PRONK W, LARSEN T A. Treatment processes for source-separated urine[J]. *Water Research*, 2006, 40(17): 3151–3166.
- [101] PATEL A, MUNGRAY A A, MUNGRAY A K. Technologies for the recovery of nutrients, water and energy from human urine: a review [J]. *Chemosphere*, 2020, 259: 127372.
- [102] SANGARE D, SOU/DAKOURÉ M, HIJIKATA N, et al. Toilet compost and human urine used in agriculture: fertilizer value assessment and effect on cultivated soil properties[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(10): 1291–1298.
- [103] SABAR M A, HONDA R, HARAMOTO E. CrAssphage as an indicator of human-fecal contamination in water environment and virus reduction in wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2022, 221: 118827.
- [104] SALEHI A S M, YANG S O, EARL C C, et al. Biosensing estrogenic endocrine disruptors in human blood and urine: a RAPID cell-free protein synthesis approach[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2018, 345: 19–25.
- [105] 蔡佳盛, 施教忠, 叶志隆, 等. 水冲和节水农村公厕粪便资源化利用风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2226–2235. CAI J S, SHI J Z, YE Z L, et al. Ecological risk assessment of utilization of human excrement resources derived from water-flushing and water-saving public toilets in rural area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10): 2226–2235.
- [106] TERVAHAUTA T, RANI S, LEAL L H, et al. Black water sludge reuse in agriculture: are heavy metals a problem?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 274: 229–236.