



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>

源分离尿液替代化肥农业利用的前景及存在问题

于广泉, 张丹丹, 张春雪, 徐艳, 杨波, 魏孝承, 郑向群

引用本文:

于广泉, 张丹丹, 张春雪, 徐艳, 杨波, 魏孝承, 郑向群. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0764>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析

谢婷, 张慧, 苗洁, 宋明伟, 曾艳琴

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 839–848 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0494>

中国主要农作物化肥用量估算

侯萌瑶, 张丽, 王知文, 杨殿林, 王丽丽, 修伟明, 赵建宁

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 360–367 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0061>

接种功能内生细菌降低作物体内POPs污染

孙凯, 李舜尧

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 397–404 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0080>

生态空间格局优化与景观要素耦合视角下环水有机农业面源污染控制技术

王磊, 席运官, 潘阳, 陈秋会, 和丽萍, 李丽娜, 吴见珣, 杨育文, 刘明庆, 杨涛明, 杨赵, 田伟, 高吉喜

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 160–166 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0219>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

源分离尿液替代化肥农业利用的前景及存在问题

于广泉, 张丹丹, 张春雪, 徐艳, 杨波, 魏孝承*, 郑向群*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:源分离尿液中含有大量的氮、磷、钾等营养物质,具有资源性和污染性的双重特征。本文阐述了源分离尿液的特征,归纳了源分离尿液营养物质的回收以及尿液还田对农作物生长的影响,明确了现阶段人尿在农业利用上对土壤理化、药物积累等方面产生的主要问题,最后对源分离尿液替代化肥农业利用的前景进行了展望,指出源分离尿液在农业利用中的潜力,为人尿用作液体肥料科学还田提供了指导和借鉴。

关键词:源分离尿液;营养物质回收;农业利用;农作物;土壤

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)02-0256-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0764

Prospects and problems in the agricultural utilization of source-separated urine as a substitute for chemical fertilizers

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

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

Abstract: Source-separated urine contains a large amount of nutrients, such as nitrogen, phosphorus, and potassium, which can be both resources and pollutants. This article describes the characteristics of the source-separated urine, summarizes the technology for nutrient recovery from the source-separated urine, summarizes the effects of urine on crop growth, and clarifies the main effects of utilization of human urine on soil physicochemical characteristics and drug accumulation. Finally, the prospects for the agricultural utilization of source-separated urine as a substitute for chemical fertilizers are identified, which would provide a research direction for the return of human urine as liquid fertilizer.

Keywords: source-separated urine; nutrient recovery; agricultural use; crop; soil

世界人口的快速增长导致人们对粮食的需求量持续增加,为保证粮食产量满足供应需求,化肥的使用量和需求量成倍增加^[1]。目前,我国已经成为世界上最大的化肥生产国和使用国,自1980年以来,我国的化肥施用量以每年4%的速度增长^[2]。1980—2010年,我国化肥使用量几乎翻了两番,氮肥从94 kg·hm⁻²增至243 kg·hm⁻²,磷肥从28 kg·hm⁻²增至116 kg·

hm⁻²^[3]。由于我国农业发展对化肥的依赖程度很高,近年来过度施用化肥所引发的问题受到越来越多的关注。一方面,化肥的大量使用导致氮、磷、钾矿等自然资源的大量消耗,造成原材料供应不足。另一方面,化肥的过度使用还会造成环境污染,例如:①导致氨氮和氮氧化物排放到大气中,对臭氧层造成危害^[4];②造成土壤中硝酸盐的积累,导致土地的盐碱

收稿日期:2020-12-20 录用日期:2021-05-14

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:魏孝承 E-mail:13752221539@163.com; 郑向群 E-mail:zhengxiangqun@126.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);创新工程所级重点项目(2020-cxgczdrrw-zxq)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800201); Special Fund for Basic Scientific Research of Central Public Welfare Institutes (Y2020LM08); Institute Level Key Project of Innovation Engineering (2020-cxgczdrrw-zxq)

<http://www.aed.org.cn>

化和酸化^[5],而酸化会加快土壤钙、镁的淋溶,降低碱基饱和度和土壤肥力^[6];③造成土壤重金属污染,如某些化肥中含有镉、汞和砷等,这些重金属在生产过程中进入肥料或出现在原料中^[7],最终进入农田造成污染;④导致营养物质不能被作物完全吸收而渗入地下或随着农田退水进入河流、湖泊等,最终导致地下水^[8]或地表水污染^[9]。因此亟需找到一种可替代化肥的有机肥料,减少自然资源的消耗,同时,在保证作物产量和质量的前提下,降低对环境的污染。人尿作为生态型的有机肥,含有丰富的N、P、K等营养物质,若用于农业生产,可有效增加地力,被认为可以部分替代化肥^[10]。

目前关于尿液的处理方式主要包括两种:一是经化粪池处理后排入污水管网,最终进入污水处理厂^[11];二是与粪便一起经化粪池处理或单独收集处理后直接还田或制成肥料后还田^[12]。研究表明,生活污水中80%的N、56%的P和63%的K来自尿液^[13],将尿液当作污染物直接排入污水管网,不仅造成资源的浪费,还会增加污水处理厂的负担。此外,在人类排泄物中,尿液是N、P、K的主要贡献者,分别占88%、67%、73%^[14],其中,90%~100%的N以尿素或铵的形式存在^[15],P和K几乎全部(95%~100%)以无机形式存在^[16],这些元素可被大部分植物吸收利用^[17]。近年来,许多国家对从人类尿液中回收N、P、K等营养物质开展了大量研究^[18],结果表明,在弱酸性土壤中,尿基肥料中的N和P与化肥中的N和P同样容易被植物利用^[19]。同时,许多国外学者对尿液直接农用进行了研究,结果显示,尿液用于种植玉米^[20]、萝卜^[21]、卷心菜^[22]等过程中,可以显著提高这些作物的产量,尿液直接作为作物肥料的农用价值受到了越来越多的关注^[23]。除此之外,使用人类尿液肥料还可以在一定程度上减少化学肥料的用量,并进一步减少肥料生产和运输过程中造成的环境污染^[24]。然而,我国作为传统农业大国,虽然人粪尿还田已有上千年的历史,但是对于如何在农业种植中科学使用尿液,实现尿液价值最大化,特别是关于源分离尿液作为肥料替代化肥的可行性方面还有待进一步深入研究和探讨。

本文针对源分离尿液及其营养成分回收、农业利用和利用中存在的问题等进行归纳总结,并对未来人尿农业利用研究给出建议和展望,旨在探讨尿液替代化肥农业利用的前景和存在的问题,促进人尿在我国农业种植上的科学高效利用。

1 源分离尿液

1.1 源分离

19世纪末,大部分工业国家出现了集中式供排水系统,水冲厕所(便器)应运而生。这虽然极大地改善了城市居民卫生状况以及城市水环境质量,但这种方式不仅消耗大量水资源,同时也阻断了粪便、尿液中营养物质回归土地的生态之路^[25]。近年来,基于粪便、尿液源分离概念的生态卫生/排水(ECOSAN)技术在国际上开始受到重视,并在包括我国在内的许多国家得到实践^[26]。源分离是指从源头——便器入手,将粪便和尿液单独收集、输送、处置、利用,不再将其与其他污水混合,而被单独收集的尿液可回收营养物质作为肥料,也可就近处理后返回农田,作为养分被农作物吸收利用^[27]。基于源分离的粪尿分集式厕所能够很好地将粪尿分开单独收集,实现如厕环境卫生化和尿液回收资源化,其结构如图1所示。

1.2 尿液的产生量

据统计,成人每日小便4~5次,排尿约1.0~1.5 L^[28],平均每年排尿约500 L^[29],而儿童的小便约是成人的一半^[30],由此可见人尿的排放量是巨大的。一个成人每年的尿液排放量相当于生产250 kg谷物所需的肥料量,这也是一个成人每年需要消耗的谷物量^[31]。此外,据估算,我国每年产生纯大便 1.5×10^8 t、纯尿液 4.5×10^8 t,转化生成生活污水 5.0×10^{10} t。如果把源源不断的粪尿进行资源化利用,如制成有机肥、

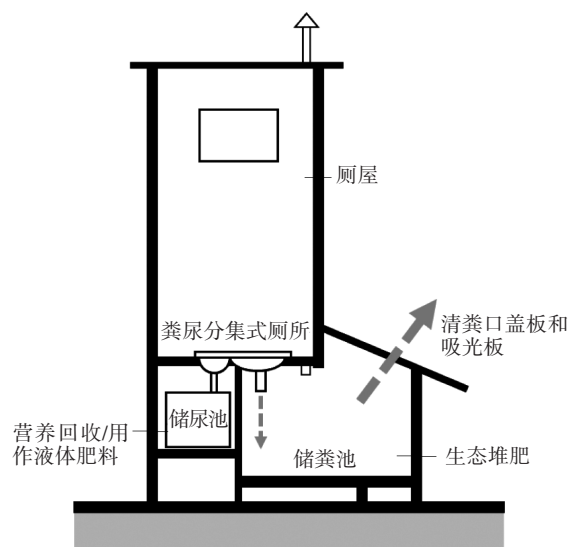


图1 源分离粪尿分集式厕所结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of source separation feces and urine diversity toilet structure

沼气等,可替代部分化肥和能源,形成良性循环,将对生态文明建设做出重要贡献^[32]。

1.3 尿液成分

从化学成分来看,人的尿液是一种富氮的水溶液,其总量的97%是水^[33]。在新鲜人体尿液中,大部分N(75%~90%)以尿素[CO(NH₂)₂]的形式存在,少量的N是以尿酸、氨基酸和其他物质形式存在^[34]。尿液中的大部分N元素都能够被植物吸收,并且尿液中的N含量与尿素或铵肥的氮含量相近,约为化学肥料的90%^[29]。当尿液排出体外时,只有7%是以氨的形式排出^[35]。另外,尿液还含有H₂PO₄⁻、HPO₄²⁻、K⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻和可溶性有机物^[36]。人体尿液中N、K、P和Na的平均浓度分别为(3.07±1.15)、(1.7±0.2)、(0.020±0.004) g·L⁻¹和(1.17±0.12) g·L⁻¹。尿液中的营养成分取决于食物摄入量、体型、体育活动、饮水量和环境因素^[37]。SCHOUW等^[38]研究发现大多数发展中国家的人类尿液中的氮含量可能低于发达国家,因为发达国家的混合饮食含有更多的蛋白质。除上述元素外,人体尿液中还含有B、Cu、Zn、Mo、Fe、Co、Mn等能够被植物所吸收利用的微量元素^[39]。尿液中的主要成分见表1。

1.4 尿液的贮存

尿液贮存是指源分离尿液被收集之后处理利用之前,在源分离厕所或中转站进行贮存的过程。在室温下储存人类尿液被认为是一种卫生的选择,在非种植季节提前储存还可以保证其营养物质的效果^[47]。储存人类尿液的卫生状况取决于时间和温度,革兰氏阴性菌初始浓度降低90%所需的时间不超过5 d,降低90%的隐孢子虫需要1个月,而去除90%的病毒则需要1~2个月不等^[48]。储存期间,在细菌活性,特别是脲酶的影响下,尿素被分解成氨和二氧化碳,从而使pH值升高,这是提高病原体失活率的关键因素^[49]。pH值在8.9~9.0时,储存尿液中95%的氮由氨态氮组成^[35]。随着pH的升高,碳酸氢盐和氨浓度逐渐增加,尿液的缓冲能力也随之增大,从而杀死尿液中的有害物质^[50]。研究表明,如果尿液在20℃或更高的温度下储存2~6个月,其病原体含量可降低到施用安全水平,同时植物所需的营养物质分解转化为营养盐,可以作为农业的液体肥料,并有效提高施肥效果^[51-52]。

2 源分离尿液中营养物质的回收

2.1 氮回收

在城市污水中,尿液只占废水总量的1%,其中所含的总氮(TN)、总钾(TK)和总磷(TP)却占废水中TN

表1 人尿液主要理化性质及营养成分

Table 1 Physico-chemical properties and nutrient composition of human urine

参数 Parameter	数值 Value	参考文献 Reference
pH	8.9~9.2	[40]
	8.8	[39]
电导率 EC/(mS·cm ⁻¹)	47.2	[17]
	22.6±6.3	[41]
化学需氧量 COD/(g·L ⁻¹)	5.5±0.2	[39]
	7.66±4.63	[41]
总氮 TN/(g·L ⁻¹)	3.48±0.13	[39]
	3.07±1.15	[40]
	2.702	[42]
	8.36	[17]
	4.5	[43]
氨氮 NH ₄ ⁺ -N/(g·L ⁻¹)	1.80±0.75	[39]
	1.117~1.726	[36]
	2.3~2.9	[44]
硝氮 NO ₃ ⁻ -N/(μg·L ⁻¹)	45	[36]
	10	[17]
总磷 TP/(g·L ⁻¹)	0.190±0.052	[39]
	0.020±0.004	[40]
	0.37	[42]
	2.03	[17]
	0.26	[43]
钾 K/(g·L ⁻¹)	0.6	[39]
	1.7±0.2	[40]
	0.314	[42]
	2	[17]
	0.87	[43]
钠 Na/(g·L ⁻¹)	0.69±0.03	[39]
	1.17±0.12	[40]
	2.34	[17]
	0.88	[43]
硼 B/(mg·L ⁻¹)	0.435~0.440	[36]
铜 Cu/(μg·L ⁻¹)	155	[36]
	1.3~10.8	[45]
锌 Zn/(μg·L ⁻¹)	70~110	[36]
	19~665	[45]
钼 Mo/(μg·L ⁻¹)	45	[45]
	2.4~14.0	[46]
铁 Fe/(mg·L ⁻¹)	0.165~0.205	[36]
钴 Co/(μg·L ⁻¹)	1.0~12.0	[36]
	0.27	[45]
锰 Mn/(μg·L ⁻¹)	0.062	[45]

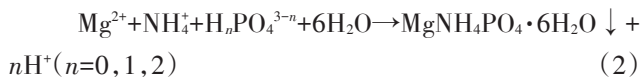
的75%~87%、TK的50%~90%、TP的40%~50%^[53]。研究表明,通过回收尿液可以将废水转化为可持续的、有价值的营养物质,并用作肥料^[54]。从源分离的尿液

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一个有前景的解决方法^[55]。如,通过气提法将尿液中无机形态的氨从液相中提取出来^[56],随后与硫酸发生化学反应,形成硫酸铵,反应式如下:



2.2 磷回收

P元素在地壳中含量丰富,是所有生物必需的元素,它代表了生物在细胞水平的能量值^[57]。据估算,从尿液中回收的P可以满足全球P需求量的22%^[58]。但是与N不同,人类尿液中的P必须以鸟粪石沉淀的形式转化为固体^[59]。其中鸟粪石是由可溶性正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、铵(NH_4^+)、镁(Mg^{2+})按摩尔比1:1:1进行化学反应沉淀而成^[60]。该过程中,88%的沉淀物以鸟粪石的形式存在^[61]。除了鸟粪石,其他矿物质,如钙矾石($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)、水镁石 $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ 和菱镁石(MgCO_3)也可以根据尿液中其他二价或三价金属阳离子的数量形成。在1:1:1摩尔比下,鸟粪石沉淀的一般反应遵循如下反应式:



然而,由于鸟粪石沉淀反应必须由Mg诱导,而金属Mg价格比较昂贵,添加Mg使得该沉淀反应成本很高^[62],因此该技术在应用中不具优势。今后还需进一步深入研究,开发出更加经济且高效的分离技术。

2.3 钾回收

人尿中含有一定量的K元素,从尿液中回收K不仅可以实现资源回收利用,还可以减少城市污水处理中所消耗的能量和成本^[63]。目前使用的回收技术主要有流化床结晶(Fluidized bed crystallization, FBC)工艺,即利用结晶原理和流化床方法,在沉淀反应体系中加入粒状固体填料,将要去掉的物质结晶沉积在填料的表面上^[64-65]。Ca或Mg的加入,使得P和K能够以三元化合物 $[\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}, \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}, \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ 的形式被回收。此外,该沉淀反应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^[66]。

3 尿液直接农业利用

3.1 尿液用于作物种植

许多研究者将储存处理后的尿液直接用于作物

种植,发现施用尿液能够显著提高作物的产量、株高等农艺性状。MORGAN^[67]在津巴布韦对各种蔬菜和玉米进行的试验研究表明,施用水稀释的人类尿液(水和尿液的比例为3:1)作为液体肥料,蔬菜的产量最高。PANDORF等^[21]的研究表明,与不施肥相比,仅施用尿液可使萝卜产量增加35%。在对卷心菜、高粱、红甜菜、香蕉和玉米的研究中,施用尿液可以提高这些作物的产量。研究表明,在补充肥料的情况下,施用尿液的作物产量超过了施用化肥,尿液促进了菜豆生物量的增长,与空白对照处理相比,菜豆产量在秋季和春季分别增长了82.2%和340.7%,这是由于尿液的施用满足了种植过程中P、K的需求^[21]。PHILIP等^[22]的研究发现,施用尿液能够提高卷心菜的株高、叶片数和冠层数,分别提高2.5%、2.4%和4.0%。

另外,在人尿与化肥的对比试验中,AKPAN-IDIOK等^[43]的研究发现,在温室试验中,与不施肥相比,施用尿液和化学肥料的秋葵生物量和叶产量均有所提高。其中,施用20 000 L·hm⁻²尿液处理的植株茎干质量最高。HEINONEN-TANSKI等^[44]在两种施肥条件下(施用尿液和化肥),通过对比分析两种施肥的累积收获发现,施用尿液的黄瓜产量在统计学上略高于施用化学肥料。PRADHAN等^[68]的研究表明,施用化学肥料23 d的南瓜生长速率略高于施用尿液和未施肥的南瓜,但从第44 d开始,施尿液肥料的植物生长更快,并在第50 d超过了化学肥料的处理,约第65 d,未施肥的藤蔓长于施用化学肥料的藤蔓。而在整个实验过程中,施尿液的南瓜生长速率高于未施肥的南瓜。其随后的研究证实,与未施肥的番茄相比,施用尿液生产的番茄果实产量高出4.2倍,假如能够最大程度地减少蒸发,其产量会更高^[17]。除上述研究外,世界多地均开展了施用尿液种植作物的研究,主要集中在北欧和非洲,相关研究结果见表2。

3.2 全球消费者对人尿种植食物的食用意愿

随着化肥使用导致的农业面源污染、气候变化、土壤酸化以及生物多样性降低等环境问题日益突出,尿液替代化肥的农业利用,特别是尿液作为肥料种植作物方面受到全世界越来越多的关注。为此,国外学者专门调查了全球不同国家消费者对施用尿肥所种植食物的食用意愿,结果显示,总体上有68%的人支持尿液的资源回收利用,59%的人明确表示愿意食用以尿肥种植的食物,仅有11%的人认为以尿肥种植的食物存在健康风险,并且无法通过后续处理进行消除^[77]。该调查结果(图2)表明,受认知和社会因素的

表2 尿液作为肥料的研究结果

Table 2 Summary of studies using urine as the fertilizer

作物 Crop	处理 Treatment	产量 Yield	地域 Region	参考文献 Reference
四季豆	空白 人尿	0.529 t·hm ⁻² 1.437 t·hm ⁻²	美国	[21]
萝卜	空白 人尿	4.460 5 t·hm ⁻² 9.862 5 t·hm ⁻²	美国	[21]
黑麦草	鸟粪石废水 人尿	0.602 t·hm ⁻² 0.707 t·hm ⁻²	南非	[69]
卷心菜	空白 人尿:121 kg·hm ⁻² (以N计)	15.6 t·hm ⁻² 19.8 t·hm ⁻²	加纳	[22]
鹰嘴豆	空白 磷肥 30 kg·hm ⁻² (以P ₂ O ₅ 计)+ 人尿 10 kg·hm ⁻² (以N计)	4.6 g·株 ⁻¹ 5.3 g·株 ⁻¹	印度	[70]
甜椒	尿素:100 kg·hm ⁻² 人尿:100 kg·hm ⁻² 堆肥:100 kg·hm ⁻²	390.2 g·株 ⁻¹ 363.2 g·株 ⁻¹ 354.9 g·株 ⁻¹	尼泊尔	[71]
秋葵	空白 人尿:45.8 kg·hm ⁻² (以N计) 人尿:68.70 kg·hm ⁻² (以N计) 人尿:91.60 kg·hm ⁻² (以N计) 化肥:60 kg·hm ⁻² (以N计)	16.2 g·株 ⁻¹ 23.5 g·株 ⁻¹ 26.2 g·株 ⁻¹ 33.8 g·株 ⁻¹ 31.5 g·株 ⁻¹	尼日利亚	[43]
苋菜	空白 人尿:100 kg·hm ⁻² (以N计) 堆肥:100 kg·hm ⁻² (以N计) 化肥:100 kg·hm ⁻² (以N计)	23.2 t·hm ⁻² 58.2 t·hm ⁻² 32.5 t·hm ⁻² 34.3 t·hm ⁻²	尼日利亚	[72]
高粱	空白 人尿 化肥 堆肥	0.57 t·hm ⁻² 1.83 t·hm ⁻² 1.37 t·hm ⁻² 2.34 t·hm ⁻²	加纳	[73]
菠菜	空白 人尿:200 kg·hm ⁻² (以N计) 人粪肥:200 kg·hm ⁻² (以N计) 化肥:200 kg·hm ⁻² (以N计)	88.9 g·盆 ⁻¹ 162 g·盆 ⁻¹ 123 g·盆 ⁻¹ 150 g·盆 ⁻¹	南非	[74]
红甜菜	空白 人尿:133 kg·hm ⁻² (以N计) 化肥:133 kg·hm ⁻² (以N计)	3.30 t·hm ⁻² 17.8 t·hm ⁻² 16.2 t·hm ⁻²	芬兰	[17]
芥菜	空白 人尿:78 kg·hm ⁻² (以N计) 人粪肥:73 kg·hm ⁻² (以N计)	135 g·株 ⁻¹ 371 g·株 ⁻¹ 131 g·株 ⁻¹	尼泊尔	[75]
玉米	空白 人尿 化肥 人粪肥	1.65 t·hm ⁻² 2.76 t·hm ⁻² 3.31 t·hm ⁻² 3.86 t·hm ⁻²	印度	[76]
番茄	空白 人尿:135 kg·hm ⁻² (以N计) 化肥:135 kg·hm ⁻² (以N计)	20.4 t·hm ⁻² 86.4 t·hm ⁻² 110 t·hm ⁻²	芬兰	[17]
黄瓜	人尿:233 kg·hm ⁻² (以N计) 化肥:34 kg·hm ⁻² (以N计)	30.0 t·hm ⁻² 25.0 t·hm ⁻²	芬兰	[44]
南瓜	空白 人尿:113 kg·hm ⁻² (以N计) 化肥:113 kg·hm ⁻² (以N计)	11.9 kg·plot ⁻¹ 17.1 kg·plot ⁻¹ 48.4 kg·plot ⁻¹	芬兰	[68]

影响,不同国家和地区居民的食用意愿差异较大。中国、法国和乌干达80%以上的受访对象愿意食用以尿肥种植的食物,巴西和美国等地受访对象的食用意愿也超过了60%,以色列也有接近60%的受访

者愿意食用以尿肥种植的食物。此外,由这一调查结果也可以看出,随着人们对新的卫生系统信任感的提升,施用尿液种植的作物将会受到越来越多的认可,尿液的农业利用价值也会受到越来越多的重视。

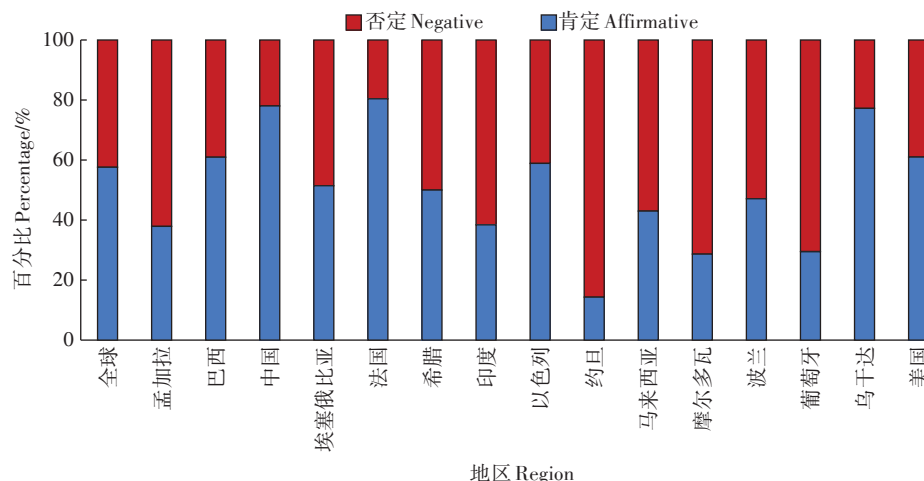


图2 消费者对施用尿肥所种植食物的食用意愿

Figure 2 Consumers' perception of crops grown with human urine as fertilizer

4 尿液农业利用存在的问题

虽然已有大量研究证明,尿液是一种非常好的肥料,而且农业种植实验结果也表明,尿液农用可以取得较高的产量。但是在传统的食物生产系统中,对于尿液的农业利用仍然存在一些问题,如尿液营养物质回收的技术问题、源分离尿液收集的设施建设问题、尿液农用的环境问题等。

4.1 营养物质回收的技术问题

目前尿液资源化利用技术中,研究最多的是营养物质回收技术,如前文提到的N、P、K回收技术等。其中N回收技术包括离子交换、膜蒸馏、正向渗透、吹脱法、微生物燃料电池、电化学法等;P回收技术包括鸟粪石沉淀、反渗透盐水沉淀、吸附法等;K回收技术包括流化床结晶、流化床均质结晶等^[78-80]。然而,目前的这些营养物质回收技术,要么成本太高,要么操作复杂,要么技术不够成熟,且均存在无法同时回收所有营养元素的问题,现阶段难以实现市场推广应用^[81-83]。

4.2 源分离尿液收集的设施建设问题

据中国经济与社会发展数据库显示,虽然我国绝大多数农户对用粪尿种植作物无观念障碍,但随着农村自来水日益普及,农户对操作简单、使用方便、干净卫生的水冲厕所的需求越来越高,仅少数缺水地区农户能够接受使用管理更加繁琐的粪尿分集厕所。此外,基于现有技术进行家庭规模的尿液处理效率低且成本高,在家庭存储的基础上再进行集中收集和转运是当前最好的做法^[84]。但是要实现源分离尿液的集中收集,除了建立源分离的厕所外,还需要单独的尿液

输送管道和储存装置,这必然导致建设成本的增加。

4.3 尿液直接农用的环境问题

4.3.1 土壤盐渍化

施用尿液最大的影响之一是可能导致土壤盐渍化。人尿的施用会使土壤的电导率和盐度增加,最终造成土壤盐渍化,在农业生产力较低的情况下,甚至会导致作物歉收^[85]。土壤盐渍化主要受排水条件、土壤类型和气候等因素的影响,在干旱和半干旱地区,由于土壤剖面上积累的盐不能被雨水定期冲刷,很容易产生盐渍化^[86]。根据土壤类型和排水条件的不同,土壤中的盐分在溶解浓度超过 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现盐渍化,当溶解浓度超过 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及钠的吸附比超过39时,盐分就会危及土壤质量^[87]。

4.3.2 土壤酸化

人类尿液作为一种速效液体肥料,需要谨慎施用和合理调控,如果不加以控制,就会导致尿液中 NH_3 挥发。HU等^[88]研究发现,施用液体有机肥料最有可能导致土壤中 NH_4^+ 水解生成 H^+ 和 NH_3 ,导致大气中 NH_3 排放增加,同时带来土壤酸化风险。KASSA等^[20]的研究表明,施用尿液后的土壤表层磷酸盐浓度与各对照具有显著差异,且随尿量的增加土壤磷酸盐的浓度升高。但是,与各对照相比,底部取样处理的土壤几乎没有变化。这可能是因为在表层土壤的吸附和沉淀位点饱和之前,磷酸盐离子不会迁移^[89]。ADEOLUWA等^[172]的试验结果表明,在pH值为4.8的酸性土壤中施用100%尿液、2/3尿N+1/3堆肥N和100%堆肥N,试验结束时pH值降至4.7,有机碳含量最高的处理是施用100%尿液,其含量高达 $13.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而各处理中其他土壤元素差异不明显。

4.3.3 致病菌和药物积累

尿液肥料化最主要的人体健康风险问题源于尿液中可能含有的人类病原体。虽然肠道病原体主要以粪便而非尿液的形式排出,但源分离的尿液与粪便的交叉污染已被证实^[90]。据统计,人类为了治疗疼痛、心血管类或癫痫类等疾病所服用的一些药物,如氨苄西林、卡马西平、环丙沙星、布洛芬、甲氧苄氨嘧啶、磺胺甲恶唑等^[91-92],大多会通过尿液(部分是通过粪便)以原母体化合物或代谢物形式排出^[93-95],如果直接施用这种含有药物的尿液可能会给农田带来一定的风险^[96],因此需对尿液进行无害化处理后才能进行农业利用。

5 结论与展望

人尿中含有丰富的N、P、K等元素,能够满足作物正常生长需求,依据生态循环理论,将源分离尿液最终作为液体肥料回归农田应是其最佳处置途径。尿液中营养物质的回收可以减少N、P、K等矿产资源的消耗,同时尿液回归农田还可以提高作物的产量。因此以源分离尿液作为肥料替代化肥是值得研究和具有前景的方向,但还需要解决好尿液营养物质回收的技术问题、收集设施建设的问题以及还田对土壤环境所带来的负面影响。本文对源分离人尿替代化肥农业利用提出以下展望:

(1)我国作为农业人口大国,人尿资源丰富,具有巨大的利用潜力。开展源分离尿液营养物质回收和人尿还田利用,不仅有利于减少不可再生资源的开发利用,而且能够改善因使用化肥而导致的一系列环境问题。特别是在我国广阔的农村地区,将人尿有效地替代化肥,在降低种植成本的同时,还可实现对农村厕所粪污的资源化利用,改善农村人居环境。因此,源分离人尿中营养成分的回收和科学还田将是我国实现碳达峰、碳中和的重要举措之一。

(2)人尿直接还田可能造成土壤盐渍化和土壤酸化。因此在今后的尿液还田过程中,应正确管理农业用尿,最大限度地提高利用效益,减少不利影响。在施用尿液过程中,应多方面综合考虑,如尿液施用量、作物类型、作物营养需求以及土壤性质等。为降低尿液作为农业肥料所带来的负面影响,应进一步改进农业实践操作,建立尿液施用标准,并定期监测尿液施用区域地下水质量,避免地下水污染。

(3)由于人体排出的尿液中含有某些残留药物,直接将其施用到农田中可能会对农作物产生毒害作

用。目前,源分离人类尿液中残留的药物的潜在负面影响尚不明确,同时,对于人类尿液中的药物成分及其在土壤中的积累、迁移和被作物吸收的研究还鲜见报道。因此,建议深入开展相关方面的研究,并根据相关成果提出基于生物-物理-化学过程的人类尿液预处理方法和技术,以降低病原体污染食用作物的风险,保障人类的身体健康。

参考文献:

- [1] KISHOR N, KALE S, AGRAWAL P S. Use of fertilizers derived from urine as a plant growth regulator[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 32(3):504-509.
- [2] 栾江, 仇宏伟, 赵静. 中国农业生产中化肥过度使用状况及地域分布差异[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2018, 35(1):40-48. LUAN J, QIU H W, ZHAO J. Excessive use of fertilizer and its difference of geographical distribution in China agricultural production[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University(Natural Science)*, 2018, 35(1):40-48.
- [3] LIU Q, ZHU M. Determination of molar ratio of primary secondary and tertiary amines in polymers by applying derivatization and NMR spectroscopy[J]. *Polymer Testing*, 2016, 56:174-179.
- [4] 张娟. 关于化肥造成的环境污染及其防治对策[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(6):99-100. ZHANG J. Contamination of environment and countermeasures of chemical fertilizer[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017, 42(6):99-100.
- [5] 汪生新. 浅谈化肥过量施用的危害及防治措施[J]. 青海农林科技, 2018(2):34-35, 67. WANG S X. Harm of excessive application of chemical fertilizer and its control measures[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2018(2):34-35,67.
- [6] 金凤. 过量使用化肥对环境的污染及防治对策[J]. 绿色科技, 2018(4):102-103. JIN F. Environmental pollution caused by excessive use of chemical fertilizers and countermeasures for prevention and control[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2018(4):102-103.
- [7] 周雷. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 农民致富之友, 2018(7):82. ZHOU L. The negative influence of applying chemical fertilizer on agricultural ecological environment and countermeasures[J]. *Nongmin Zhifu Zhiyou*, 2018(7):82.
- [8] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1):48-55. LIU F, TONG Y A, WANG X Y, et al. Effects of N, P and K fertilization on spring maize yield and fertilizer use efficiency in WeiBei rainfed highland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1):48-55.
- [9] SHI P, ZHANG Y, SONG J X, et al. Response of nitrogen pollution in surface water to land use and social-economic factors in the Weihe River watershed, northwest China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50:101658.
- [10] RANDALL D G, NAIDOO V. Urine: The liquid gold of wastewater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(2):2627-2635.

- [11] 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.
- [12] DRANGERT J O. Fighting the urine blindness to provide more sanitation options[J]. *Water SA*, 1998, 24(2):157–164.
- [13] HÖNGLUND C. Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source-separated human urine[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002.
- [14] MAURER M, SCHWEGLE P, LARSEN T A. Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(1):37–46.
- [15] RICHERT S A, RODHE L, AKERHJELM H. Humanurin som gödselmedel-Växtnäring, spridningsteknik och miljöeffekter[R]. Uppsala: Swedish Institute of Agricultural Engineering, 2001.
- [16] LENTNER C. Units of measurement, body fluids, composition of the body, nutrition[J]. *Journal of Nutrition Education*, 1982, 14(4):164–164.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] BONVIN C, ETTER B, UDERT K M, et al. Plant uptake of phosphorus and nitrogen recycled from synthetic source-separated urine[J]. *Ambio*, 2015, 44(Suppl 2):217–227.
- [20] 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.
- [21] 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*, 2019, 67(1):50–62.
- [22] PHILIP A, NOAH A, OLUFUNKE C. Effect of urine, poultry manure, and dewatered faecal sludge on agronomic characteristics of cabbage in Accra, Ghana[J]. *Resources*, 2017, 6(2):19.
- [23] MNKENI P N S, KUTU F R, MUCHAONYERWA P. Evaluation of human urine as a source of nutrients for selected vegetables and maize under tunnel house conditions in the eastern Cape, South Africa [J]. *Waste Management Research*, 2008, 26(2):132–139.
- [24] KARAK T, BHATTACHARYYA P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2011, 55(4):400–408.
- [25] 郝晓地, 衣兰凯, 仇付国. 源分离技术的国内外研发进展及应用现状[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(12):1–7. HAO X D, YI L K, QIU F G. Global R&D progress and applied situation of source separation techniques[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(12):1–7.
- [26] WINBLAD U, SIMPSON-HEBER T M. Ecological sanitation[M]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2004.
- [27] 蒋善庆, 王晓昌, 李超, 等. 源分离尿液资源化利用与风险控制技术研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(5):174–182. JIANG S Q, WANG X C, LI C, et al. Review on the resource utilization and risks control technologies of source-separated urine[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(5):174–182.
- [28] CHANG Y, WU Z, BIAN L, et al. Cultivation of *Spirulina platensis* for biomass production and nutrient removal from synthetic human urine [J]. *Applied Energy*, 2013, 102(2):427–431.
- [29] STINZING A R, JONSSON H, VINNERAS B, et al. Guidelines on the use of urine and faeces in crop production[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2004.
- [30] FITTSCHEN I, HAHN H H. Characterization of the municipal wastewaterpart human urine and a preliminary comparison with liquid cattle excretion[J]. *Water Science & Technology*, 1998, 38(6):9–16.
- [31] HEINONEN-TANSKI H, WIJK-SIJESMA C V. Human excreta for plant production[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(4):403–411.
- [32] 李纯铸. 我国每年人粪尿达6亿吨, 亟待资源化利用, 三大步实现厕所革命[EB/OL]. (2019-01-04)[2020-12-20]. https://m.sohu.com/a/286736468_120047582?_trans_=010004_pcwzy. LI C Z. China has 600 million tons of human excrement and urine every year. It is urgent to make use of resources and realize the toilet revolution in three steps[EB/OL]. (2019-01-04)[2020-12-20]. https://m.sohu.com/a/286736468_120047582?_trans_=010004_pcwzy.
- [33] POPPENDIEK H F, RANDALL R, BREEDEN J A, et al. Thermal conductivity measurements and predictions for biological fluids and tissues[J]. *Cryobiology*, 1967, 3(4):318–327.
- [34] MEDEROS 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.
- [35] KIRCHMANN H, PETTERSSON S. Human urine-chemical composition and fertilizer use efficiency[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 40(2):149–154.
- [36] MAURER M, PRONK W, LARSEN T A. Treatment processes for source-separated urine[J]. *Water Research*, 2006, 40(17):3151–3166.
- [37] UPRETI H, SHRESTHA P, PAUDEL P. Effect of human urine as fertilizer on crop production[J]. *Agronomy Journal of Nepal*, 2013, 2:688–690.
- [38] SCHOUW N L, DANTERAVANICH S, MOSBAECK H, et al. Composition of human excreta: A case study from southern Thailand[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 286(1/2/3):155–166.
- [39] 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.
- [40] 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.

- [41] ETTER B, TILLEY E, KHADKA R, et al. Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal[J]. *Water Research*, 2011, 45(2):852-862.
- [42] BONZI M, LOMPO F, KIBA I D, et al. A study of the agronomic efficiency of human stool and urine on production of maize and eggplant in Burkina Faso[M]//Innovations as key to the Green Revolution in Africa. Berlin: Springer, 2011:641-649.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] DAI J, TANG W T, ZHENG Y S, et al. An exploratory study on seawater-catalyzed urine phosphorus recovery[J]. *Water Research*, 2014, 66:75-84.
- [48] World Health Organization(WHO). Sanitation safety planning: Manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta[R]. Geneva:WHO, 2016.
- [49] NORDIN A. Ammonia sanitisation of human excreta[D]. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2010.
- [50] UDERT K M, LARSEN T A, GUJER W. Fate of major compounds in source-separated urine[J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(11/12):413-420.
- [51] VINNÉRÁS 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.
- [52] JAATINEN S T, PALMROTH M R T, RINTALA J A, et al. The effect of urine storage on antiviral and antibiotic compounds in the liquid phase of source-separated urine[J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(17):2189-2198.
- [53] 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.
- [54] DIMITRIS M, MARIA P, NIKOLAOS K, et al. Phosphate recovery from real fresh urine by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ treated natural zeolite[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 347:618-630.
- [55] 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.
- [56] BAAKILARDAN-KABAKCI S, PEKOLU A N, TALINLI I. Recovery of ammonia from human urine by stripping and absorption[J]. *Environmental Engineering Science*, 2007, 24(5):615-624.
- [57] CORRE K S L, VALSAMI-JONES E B, HOBBS P C, et al. Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2009, 39(6):433-477.
- [58] BARBOSA S G, PEIXOTO L, MEULMAN B, et al. A design of experiments to assess phosphorous removal and crystal properties in struvite precipitation of source separated urine using different Mg sources[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 298(8):146-153.
- [59] KABDASIL I, TUNAY O, LSLEK C, et al. Nitrogen recovery by urea hydrolysis and struvite precipitation from anthropogenic urine[J]. *Water Science & Technology*, 2006, 53(12):305-312.
- [60] 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.
- [61] LIND B, BAN Z, BYDEN S. Nutrient recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeolite and wollastonite[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 73(2):169-174.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 姜科, 周康根, 杨有才, 等. 流化床结晶法处理工业含氟废水小试及中试研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(6):1032-1041. JIANG K, ZHOU K G, YANG Y C, et al. Laboratory and pilot-scale treatment of industrial fluorine-containing wastewater by fluidized bed crystallization process[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(6):1032-1041.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] MORGAN P. Experiments using urine and humus derived from ecological toilets as a source of nutrients for growing crops[C]. Third World Water Forum, 2003.
- [68] PRADHAN S K, SUSANNA P, HEINONEN-TANSKI H. Fertilizer value of urine in pumpkin (*Cucurbita maxima* L.) cultivation[J]. *Agricultural and Food Science*, 2009, 18(1):57-68.
- [69] NTOBEKO M, ALFRED O, PARDON M. The effects of urine and urine-separated plant nutrient sources on growth and dry matter production of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.)[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 207:37-43.
- [70] GANESAPILLAI M, SIMHA P, BEKNALKAR S S, et al. Low-grade rock phosphate enriched human urine as novel fertilizer for sustaining

- and improving agricultural productivity of *Cicer arietinum*[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2016, 6:62–66.
- [71] SHRESTHA D, SRIVASTAVA A, SHAKYA S M, et al. Use of compost supplemented human urine in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) production[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 153:8–12.
- [72] ADEOLUWA O O, COFIE O. Urine as an alternative fertilizer in agriculture: Effects in amaranths (*Amaranthus caudatus*) production[J]. *Renewable Agriculture & Food Systems*, 2012, 27(4):287–294.
- [73] GERMER J, ADDAI S, SAUERBORN J. Response of grain sorghum to fertilisation with human urine[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(3):234–241.
- [74] KUTU F R, MUCHAONYERWA P, MNKENI P N. Complementary nutrient effects of separately collected human faeces and urine on the yield and nutrient uptake of spinach (*Spinacia oleracea*) [J]. *Waste Management and Research*, 2011, 29(5):532–539.
- [75] PRADHAN S K, PIYA R C, HEINONEN-TANSKI H. Eco-sanitation and its benefits: An experimental demonstration program to raise awareness in central Nepal[J]. *Environment Development & Sustainability*, 2011, 13(3):507–518.
- [76] SRIDEVI G, SRINIVASAMURTHY C, BHASKAR S, et al. Studies on the effect of anthropogenic liquid waste(human urine) on soil properties, growth and yield of maize[J]. *Crop Research*, 2009, 38(1/2/3):11–14.
- [77] 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.
- [78] 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/OL]. (2020-09-04)[2020-12-20]. 农业资源与环境学报, <http://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0326>. YU G Q, ZHENG X Q, WEI X C, et al. Research progress on resource utilization technology of human urine based on source separation[J/OL]. (2020-09-04)[2020-12-20]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, <http://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0326>.
- [79] 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.
- [80] PRADHAN S K, MIKOLA A, HEINONEN-TANSKI H, et al. Recovery of nitrogen and phosphorus from human urine using membrane and precipitation process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 247:596–602.
- [81] 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 & Technology*, 2019, 49(8):695–743.
- [82] NAUGHTON C C, AKERS P, YODER D, et al. Can sanitation technology play a role in user perceptions of resource recovery? An evaluation of composting latrine use in developing world communities in Panama[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(20):11803–11812.
- [83] ZHOU X Q, LI Z F, ZHENG T L, et al. Review of global sanitation development[J]. *Environment International*, 2018, 120:246–261.
- [84] 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 collection and storage process for resource utilization of urine[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(2):66–72.
- [85] VILLA-CASTORENA M, ULERY A L, ERNESTO A, et al. Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of Chile pepper plants[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6):1781–1789.
- [86] MATEO-SAGASTA J, BURKE J. Agriculture and water quality interactions: A global overview[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.
- [87] AYRES R S, WESTCOT D W. Water quality for agriculture[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.
- [88] 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.
- [89] WANG R, GUO S L, LI N N, et al. Phosphorus accumulation and sorption in calcareous soil under long-term fertilization[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(8):e0135160.
- [90] SCHONNING C, LEEMING R, STENSTRÖM T A. Faecal contamination of source-separated human urine based on the content of faecal sterols[J]. *Water Research*, 2002, 36(8):1965–1972.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] JEMBA P K. Excretion and ecotoxicity of pharmaceutical and personal care product in the environment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 63:113–130.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] LIENERT J, GUDEL 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.