

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.001

我国城镇生活污水源分离技术实施途径探究

张金良^{1,2}, 樊新颖^{1,2}, 蔡明^{1,2}, 高小涛^{1,2}, 付健^{1,2}, 马浩^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要:为深入了解生活污水源分离技术在我国城镇中的可实施性,系统梳理了国内外城镇生活污水源分离技术的研究进展,在此基础上分析了污水源分离后的黑水、灰水、黄水资源化潜能;根据生活污水源分离技术特点,从生活污水源分离的始端、中端和终端角度探究了适用于我国的城镇生活污水源分离、传输及处理技术,为科学合理制定符合我国国情的新型城镇供排水系统模式提供参考依据。

关键词:生活污水;源分离技术;城镇排水系统;污水资源化;负压排水系统

中图分类号:TU992.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0001-06

Approaches to implementation of urban domestic sewage source separation technology in China//ZHANG Jinliang^{1,2}, FAN Xinying^{1,2}, CAI Ming^{1,2}, GAO Xiaotao^{1,2}, FU Jian^{1,2}, MA Hao^{1,2} (1. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*; 2. *Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (under construction), Zhengzhou 450003, China*)

Abstract:For deeply understanding the feasibility of domestic sewage source separation technology in China, this paper systematically reviews the research progress of domestic sewage source separation technology in China and abroad. The potential for the utilization of black water, gray water, and yellow water resources after the separation of sewage sources was investigated, and technologies suitable for urban domestic sewage source separation, transmission, and disposal in China were explored through the whole process of domestic sewage source separation, providing a reference for developing a scientific and reasonable urban water supply and drainage system model in line with the situation in China.

Key words: domestic sewage; source separation technology; urban drainage system; sewage recycling; vacuum drainage system

城镇生活污水资源化对实现节水、节能、减排、减碳及生态城市建设具有重要的现实意义^[1]。目前我国城镇生活污水主要采用统一收集、合并处理的模式^[2],这种模式较好地解决了大型城市污水处理难的问题。但随着我国经济社会的发展和生态城市建设理念的逐渐深入,现有排水系统模式逐渐体现出投资建设费用巨大^[3-4]、水处理工艺复杂、大量温室气体排放^[5]、系统能耗较高、粪尿难以进行资源化回收利用等问题,这与我国推进污水资源化利用、实现2030年碳达峰和2060年碳中和的目标不相协调,需要对我国城镇排水系统的合理性进行反

思。鉴于现有城镇排水系统存在的不足,近年来欧美等发达国家逐渐提出生活污水源分离、按质处理的理念,以实现最大程度的污水资源化。相关研究^[6]表明,生活污水源分离技术具有较大的节能减排潜力,可分别减少98%的N₂O和25%的CO₂排放量,从而使得污水处理厂间接温室气体减排约20%,整体运行费用降低约22%。目前,我国已有研究^[7-8]侧重探索农村地区实施生活污水源分离的可能性,在城镇中鲜有大规模应用的案例。其原因是尽管生活污水源分离理念先进,能实现资源的循环利用,但各环节的技术还不够成熟,特别是黑水长

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3201302);中国博士后科学基金(2022M711288);黄河勘测规划设计研究院有限公司自立科研项目(2022-KY07)

作者简介:张金良(1963—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事多沙河流域治理与生态修复研究。E-mail: jlzhangyrec@126.com

通信作者:樊新颖(1988—),女,工程师,博士,主要从事城镇供排水系统模式研究。E-mail: fanxinying1234@126.com

距离输送技术等;此外,对原有系统的分离改造难度较大,牵涉面广。因此,现有的生活污水源分离技术主要在农村地区、单体住宅楼宇中进行初步实践。在碳中和、生态城市构建的愿景下,我国城镇排水系统亟待更新排放理念、积极探索绿色低碳循环发展模式,推进生活污水源分离技术的有效实施。本文通过回顾生活污水源分离技术国内外研究进展,分析生活污水源分离技术带来的能源回收潜能,重点探究生活污水源分离技术的具体实施途径,为我国未来城镇实施生活污水源分离提供参考。

1 源分离技术基本原理及研究进展

1.1 源分离技术内涵及原理

推荐对生活污水采用源分离技术的主要缘由是粪便和尿液仅占生活污水总量的1%~2%^[7],且粪尿属于有机污染物,是天然肥料,却被采用大量水稀释排放,导致现有排水模式不仅无法将粪尿资源化,而且极度浪费磷和水资源。以农耕文明著称的中国,自古就将粪便返还农田,形成了早期源分离技术的雏形。但是现有城镇人口密集,产生大量粪便,早期单一农户小规模粪便资源化处理方法已经难以适用。为了解决现有城镇排水系统困境,德国、瑞士、瑞典等国学者于20世纪90年代提出了源分离理念^[9]。生活污水源分离技术的核心理念是将生活污水从源头分离,对于黑水(又称为褐水,指粪便污水)、灰水(洗浴和厨房排水)、黄水(尿液污水)分别进行收集、输送、处理以实现资源化利用^[10-11],如图1所示。

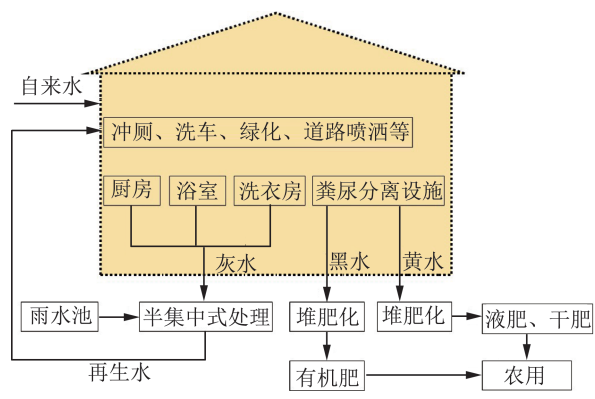


图1 生活污水源分离技术基本原理

Fig. 1 Principle of sewage source separation technology

1.2 源分离技术研究进展

20世纪末,北欧兴起了尿液分离厕所,源分离拉开了序幕,源分离技术最先在发达国家开始示范,如德国、荷兰、美国等,主要在农村地区、单个住宅、小区范围内进行了小规模实践^[12]。2003年,在欧盟委员会指导下,在德国杜塞尔多夫市某小区实施

了生活污水源分离技术示范^[13-14],运行结果显示其实际运行费用降低了18%^[10],但比传统排水系统的基础建设费用高。2006年,德国GTZ(Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit)总部大楼为降低卫生间用水采用了源分离技术^[15],经济性评估显示总投资比传统系统高出8万多欧元,但每年卫生间用水费用可降低近5000欧元。Malila等^[16]研究表明,源分离排水系统比传统排水系统的磷回收增加4倍,氮气回收增加30倍以上,水体富营养化减少到1/5。对比源分离排水系统与传统排水系统的经济和环境成本,包含系统的收集、处理和回收阶段,计算结果表明源分离排水系统效益显著^[17]。对于生活污水源分离技术,其初投资一般较大,但从全生命周期的经济效益进行评估,其性能远远优于现有集中排水系统^[18]。鉴于源分离技术良好的经济环境效益,北欧诸多国家已经规划2020—2025年在更大范围的城镇中进行试点建设运营^[12]。近年来,源分离技术也逐渐在我国部分城市中开展工程试点,如北京奥林匹克公园使用了源分离技术,对所分离出的黄水进行堆肥化处理利用^[19]。此外,张奇誉等^[7]在清华大学环境节能楼、鄂尔多斯生态小镇等地方采用粪尿分离器尝试了源分离技术,重点集中于概念的引入。综上,尽管源分离技术已经在部分城市有应用案例,但仍然缺乏从源头分离器到输送和处理系统的全过程较为完备的工程案例,并且各案例所用技术均有一定的差异,缺乏对其充分、系统的研究。

2 生活污水源分离技术能源回收潜能

生活污水资源化的利用途径主要分为3类:①对水进行资源化利用,例如将污染程度较轻的灰水处理成再生水,用于灌溉、绿化、冲厕等^[20];②对水中污染物进行资源化利用,例如将黑水、黄水用于堆肥和沼气制作等^[21];③对水的热能进行回收利用^[22-23],例如采用污水源热泵将污水中的热量进行置换回收,用于水处理厂及周边建筑小区等的热能供给。按照排水系统所得到的水质特征,生活污水资源化可分为灰水资源化、黑水资源化、黄水资源化。

2.1 灰水资源化

灰水指洗手池、衣服清洗、淋浴、浴缸、厨房水槽等收集的污水,其水量占用户总排水量的50%~80%^[11],当采用源分离技术后,其灰水比例可达90%^[24]。灰水与传统生活污水比较,其污染物浓度降低,采用膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)^[25]、流化床生物膜反应器(moving bed biofilm

reactor, MBBR) 工艺、曝气生物滤池 (biological aerated filter, BAF)、生物转盘 (rotating biological contactor, RBC)、过滤技术、人工湿地等传统水处理工艺即可实现水资源循环利用^[26]。灰水因水源和用户使用情况不同,其水质存在地域差异性^[24],实际使用时需根据实际出水水质、运行维护难度、经济等因素进行水处理工艺综合比选。目前,对于灰水的资源化利用途径有冲厕、园林灌溉、道路清洗、杂用水等,进行资源化利用时需要满足 GB/T 18920—2002《城市杂用水水质标准》、GB/T 25499—2010《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》等标准,有研究表明灰水再利用可减少城市用水 25%~40%^[27]。灰水由于缺少黑水和黄水的碳源,导致其碳氮含量较低,是目前限制灰水资源化高效利用的主要因素^[28]。

2.2 黑水资源化

黑水指粪便污水,其水量约占生活污水的 20%,采用粪尿分离真空便器后,冲厕耗水量减少 80%~90%^[29]。粪便长期以来都是绿色有机肥,采用源分离技术后,收集的高浓度粪便污水资源化途径为与秸秆、餐厨垃圾通过生物发酵形成有机肥,或通过厌氧消化处理用于沼气制作^[11],进行资源化利用时需要满足 NY 525—2012《有机肥料》和 GB/T 51063—2014《大中型沼气工程技术规范》等标准。在整个源分离系统中,其资源化效益主要来自节水,利用黑水制作有机肥的收益仅占 3%~5%,沼气次之^[30]。目前,黑水资源化利用过程中的主要限制因素为碳氮比,以人粪尿为主的有机肥、沼气制作时最佳碳氮比分别为 25:1~30:1 和 25:1。

2.3 黄水资源化

黄水指尿液,占生活废水总量的比例不到 1%,但它包含生活废水中约 80% 的氮(未稀释尿液中质量浓度约为 300 mg/L)、55% 的磷和近 60% 的钾^[31-32],其碳氮比小于 1(每人每天约贡献 13 g COD)^[33],pH 值约为 6.5^[34]。通常,一个人每天平均产生约 1.5 L 尿液,其含有约 11 g 氮、1 g 磷和 2.6 g 钾,这表明它作为肥料的潜力。黄水经氧化、BAF 和膜过滤组合工艺形成硝酸铵^[11],也有研究采用微生物电化学技术可有效地回收氨^[31, 35],回收到的氮、磷、钾资源可按照 NY 2269—2012《农业用硝酸铵钙》、GB/T 2440—2017《尿素》等标准进行农业有机肥制作,其限制肥料肥效的主要因素为回收的资源含量。有研究利用 PHREEQC 软件和 BioWIN 软件分析了磷和钾的回收效果,结果表明磷和钾的回收率分别约为 78% 和 90%^[36]。此外,通过对黄水投放镁,可形成鸟粪石肥料,但成本较高^[37-38]。

2.4 污水热能资源化

城市生活污水余热排放占城市废热排放总量的 15%~40%,平均排放温度为 27℃,比自来水温度高 2~17℃,属于低品位热源,具有非常大的余热利用潜力^[39]。生活污水余热资源化的途径是采用污水源热泵对热量进行回收,用于城市的供热、制冷,污水源热泵的能效比 (coefficient of performance, COP) 为 2.23~5.35^[40],优于其他源热泵,如空气源热泵 (COP 为 2.8~3.4) 和地源热泵 (COP 为 3.3~3.8)。据估计全球有 500 多个污水源热泵已在运行中,可提供城市约 3% 的建筑热量^[41],目前该技术被广泛用于我国北方供暖地区,如北京、黑龙江、辽宁、河北等省市。因此,可利用生活污水源分离热泵技术对灰水中的大量余热进行置换,用于周围的居住建筑、办公楼、工业建筑、温室大棚等供暖。污水热能资源回收利用时需按照 DB11/T 1237—2015《污水源热泵系统设计规范》进行设计,其主要限制因素为污水排放温度和换热器的换热效率。

3 生活污水源分类收集实施途径

根据城镇规模、污水资源化利用程度,生活污水排放系统可以分为 4 类(表 1),本文重点关注大型城镇污水高度资源化回收技术,以下分别从污水源分离器(始端)、污水传输系统(中端)和污水处理系统(终端)角度探究合适的实施技术。

表 1 生活污水排放系统类型

Table 1 Classification of domestic sewage disposal systems

污水排放系统	适用的人口密度	资源化利用程度
局部尿液分离系统	低	高
单户/多户集中排水系统	低	低
城市生活污水源分离系统	高	高
城市生活污水集中排水系统	高	低

3.1 污水源分离器

根据污水资源化利用途径,一般分别收集灰水、黑水和黄水,其中,灰水收集需直接建立灰水管道或采用目前的城市排水管道,而黑水和黄水收集需要采用尿液分离器进行分离后,再采用相应的管道系统实现对尿液分离传输,因此,黑水和黄水分离的关键是采用何种尿液分离器。尿液分离器一般设置两个排放口,中间设置隔板,分别采用真空阀控制,以实现尿液分离。目前,常见分离器主要有粪尿真空便器^[29]、尿液分离气冲便器(1 L 空气)、干厕尿液分离器(0.5 L 锯末)等^[11]。与传统便器(6~8 L 水)相比,尿液分离器实现了较大程度的节水^[30]。近年来的实际工程案例表明,黄水收集器容易结垢形成鸟粪石、碳酸钙等,

有研究对比分析了不同冲水水质、冲水量等影响因素下的黄水收集器及管道的结垢情况^[34],针对实际应用中不易结垢、易清洁、防臭的粪尿分离器还有待进一步研发。

3.2 污水输送系统

污水输送系统目前主要有3种形式:依靠重力作用传输、负压传输和压力传输,一般都存在一定的故障率,需要一定的维修时间,故障率分别为58%、77%、86%,维修时间分别为7.5 h、2 h、2 h。传统排水系统常采用重力流进行污水传输,一般需要考虑管道的坡度,长距离传输时需要中途增加泵;压力传输是采用给水泵增压产生的动力实现污水传输^[42];而负压传输系统最早由荷兰工程师 Lierunr 提出,但碍于当时技术的实施难度,很难保证负压系统运行稳定。近年来随着负压技术的逐渐成熟,采用负压输送城市生活污水成为可能,已有企业将该技术用于实践,如万若(北京)环境工程技术有限公司^[43]。负压传输技术的复杂性和高成本给该技术带来了消极的影响,但负压传输技术具有浅沟、较小的管道以及因减少挖掘而产生较低安装成本等特点,对于平坦的地形、地下水位高的地区、水保护区和容易发生洪水的地区具有很大优势。有研究对比了压力传输和负压传输的故障特点,结果表明压力传输系统的大多数故障来源于水泵,而负压传输系统的较大故障来源于真空阀^[44]。通常认为负压传输系统具有更大的优势^[45],它比重力传输和压力传输更具独特性。目前世界上最大的负压排水系统在迪拜棕榈岛建成,由40 km的管道组成,为2000栋别墅提供服务^[46]。随着基础设施的老化和生态城市概念(包括再生水利用、粪便资源化回收和沼气发电)的不断深化,负压排水技术可以为翻新或半集中式的粪尿分离系统提供可行的替代方案^[44],Skambraks 等^[12]对负压排水系统的实施条件进行了研究,结果如图2所示。

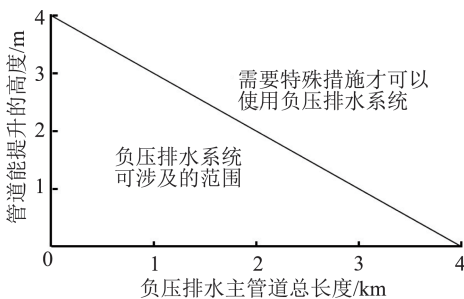


图2 负压排水系统可行性分析

Fig.2 Feasibility analysis of vacuum drainage system

针对源分离技术,灰水可采用重力系统进行传输。与灰水相比,黑水含固率高、流动性差,如采用

重力传输系统容易造成管道堵塞,且施工复杂、工程量大、泵站数量多,故黑水更适合采用负压传输系统。而对于黄水,其水量较少,流动性比较好,短距离传输可采用重力系统,如进行长距离传输仍建议采用负压传输系统。此外,黄水在管道中的停留时间是影响管道结垢的重要因素,故应合理控制黄水收集站的规模和管道内停留的时间^[34]。

3.3 污水处理系统

生活污水源分离技术实施后得到的灰水、黑水和黄水需分别单独处理。根据灰水水质特征,可采用传统污水处理系统,如MBR、MBBR、BAF、RBC、过滤技术、人工湿地等^[46]。灰水处理工艺需根据初期投资费用、后期投资费用、水处理效果、占地面积等进行合理选择。对于黑水,目前国内外常用的处理方法有化粪池处理、结合下水道和污水处理厂的二级处理、厌氧发酵、好氧发酵、药物混凝沉淀、湿式氧化处理、高温堆肥法等,其中,粪便资源化的处理主要采用厌氧、好氧、厌氧-好氧处理技术。黄水中营养元素丰富,目前相关的处理工艺也比较成熟,如利用腐熟法、离子交换吸附法、沉淀结晶法、微藻培养法、膜处理法、电化学法对其资源化利用^[38]。

综上,对于生活污水源分离已有工程应用案例,从技术层面已基本可以实现。有研究表明,生活污水源分离技术实施中大多数故障(约占2/3)来源于用户使用不当^[42],因此,大范围的推广使用需提高社会公众对生活污水源分离技术的接受度,并进行技术培训,以保证用户能从源头帮助城市实现污水源分离。为使生活污水源分离技术更好地实施,负压阀门、粪尿分离便器、黑水和黄水管道防结垢技术以及配套的智能运维系统有待进一步开展专题研究。

4 实例分析

为进一步分析生活污水源分类收集系统的效益,以某10万人规模(20个小区,每个小区5000人,日用水量2万 m^3)的城镇为例进行经济核算。假设将生活污水分为灰水和黑水进行收集,则该项目的灰水处理规模为16820 m^3/d ,黑水处理规模为380 m^3/d ,假设分离的灰水仍用于原污水处理厂。该项目的总投入为3.36亿元,包括构建生活杂用排水系统、冲厕排水系统、沼气厂、有机肥厂,较传统污水排放系统投资费用(1.38亿元)增加约1.98亿元。本项目采用源分离后进行资源化处理和利用,其中,有机肥制作时黑水与秸秆耗材比例为10:1,每年约需要10t秸秆和20个运维人员,运维费用约为40.5万元。源分离效益体现在:①节水效益,黑水由源分离负压

马桶统一收集,节水约6万 m^3/a ;灰水资源化利用后实现节水约300万 m^3/a ,合计节约1820.7万元。②节能效益,源分离系统每年节约药剂聚合氯化铝10.95t、聚丙烯酰胺10.95t,除氮除磷减少用电约180万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,合计节约121.8万元。③经济效益,项目每年生产复合肥2090t、沼气800t,合计收益195.2万元。④环境效益,源分离后将减排 N_2O 0.9t/a、 CO_2 398t/a、 CH_4 20.4t/a;水体方面减少氮365t/a、磷125t/a、钾130t/a;土壤方面减少污泥1.8万t/a,节省填埋空间1.0万 m^3/a 。通过上述项目投资、运维、效益分析,得到源分离系统整体收益为2062万元/a(由于环境减排效益的经济价值难以估计,此次计算中未考虑),经计算其投资回收期为16.3a。目前,我国一些城市常住人口超500万人,生活污水源分离技术应用规模扩大将大大缩短投资回收期,带来巨大的经济效益和社会效益,对我国实现碳中和具有重要的现实意义。

5 结 语

本文系统地分析了生活污水源分离技术的发展背景、污水资源化及其技术实施途径。城镇生活污水源分离技术是未来绿色城镇发展的方向,为更好地推动污水源分离技术的实施,应进一步研发绿色、节能、节水、节碳的生活污水源分离器、污水传输技术、污水处理工艺、智能监测与运营平台、用户反馈系统、技术评价体系,并研究编制适合我国国情的城镇生活污水源分离技术实施技术导则、设计规范、行业标准等。此外建议将城镇生活污水源分离技术纳入“十四五”规划,初步在一些新型城镇中进行规划、设计、建设、运营的全流程示范和包括经济、节能、节水、节碳、资源化、使用寿命等方面的全生命周期评价,形成一套完备的技术实施方案及评价体系,以便应用于其他城镇,尤其是新建城镇中。

参考文献:

[1] 张岳,葛铜岗,孙永利,等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. 中国给水排水,2021,37(9):65-74. (ZHANG Yue, GE Tonggang, SUN Yongli, et al. Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 65-74. (in Chinese))

[2] 张金良,蔡明,张远生,等. 我国城市给排水系统面临的困境及新系统构想[J]. 给水排水,2020,56(增刊1):589-592. (ZHANG Jinliang, CAI Ming, ZHANG Yuansheng, et al. Difficulties of urban water supply and drainage system in China and new system concepts[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(Sup1):589-

592. (in Chinese))

[3] 夏青. 城镇污水处理厂污染物排放标准修改完善的思考[J]. 水资源保护,2020,36(5):22-23. (XIA Qing. Thoughts on revision and perfection of pollutant discharge standards for urban sewage treatment plants[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 22-23. (in Chinese))

[4] 王凯,李一平,赖秋英,等. 沿海地区污水处理厂雨水混入率对设计规模的影响[J]. 水资源保护,2020,36(3):76-82. (WANG Kai, LI Yiping, LAI Qiuying, et al. Influence of rainwater mixing rate on design scale of sewage treatment plant in coastal area[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 76-82. (in Chinese))

[5] 付加锋,冯相昭,高庆先,等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算方法与案例研究[J]. 环境科学研究,2021,34(6):1-12. (FU Jiafeng, FENG Xiangzhao, GAO Qingxian, et al. Collaborative control method and case study of greenhouse gases in urban sewage treatment plants[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(6): 1-12. (in Chinese))

[6] BADETI U, PATHAK N K, VOLPIN F, et al. Impact of source-separation of urine on effluent quality, energy consumption and greenhouse gas emissions of a decentralized wastewater treatment plant[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 150(6): 298-304.

[7] 张奇誉,刘来胜. 农村分散式生活污水源分离技术现状与发展趋势分析[J]. 中国农村水利水电,2020,62(8):20-24. (ZHANG Qiyu, LIU Laisheng. An analysis of the current situation and development trend of rural decentralized domestic sewage based on source separation technology[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 62(8): 20-24. (in Chinese))

[8] 马伟辉,陈洪斌,屈计宁. 生活污水源分离、分质处理与资源化[J]. 中国沼气,2008,26(4):15-19. (MA Weihui, CHEN Hongbin, QU Jining. Progress in domestic wastewater source separation, separated treatment and resourcization[J]. China Biogas, 2008, 26(4): 15-19. (in Chinese))

[9] 王红武,张健,陈洪斌,等. 城镇生活用水新型节水“5R”技术体系[J]. 中国给水排水,2019,35(2):11-17. (WANG Hongwu, ZHANG Jian, CHEN Hongbin, et al. A novel “5R” technology system for urban domestic water saving[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 11-17. (in Chinese))

[10] 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 Xiaodi, YI Lankai, QIU Fuguo. Global R&D progress and applied situation of source separation technique[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(12):

- 1-7. (in Chinese))
- [11] 贺艺,刘华林,江海鑫,等. 基于污水源分离的分散式处理系统应用探讨[J]. 水处理技术,2019,45(2):1-6. (HE Yi, LIU Hualin,JIANG Haixin, et al. Application of decentralized wastewater treatment system based on source-separation [J]. Technology of Water Treatment, 2019,45(2):1-6. (in Chinese))
- [12] SKAMBRAKS A, KJERSTADIUS H, MREIER M, et al. Source separation sewage systems as a trend in urban wastewater management; drivers for the implementation of pilot areas in Northern Europe[J]. Sustainable Cities and Society,2017,28(1): 287-296.
- [13] PETER-FRÖHLICH A, KRAUME I, LUCK F, et al. EU demonstration project for separate discharge and treatment of urine, faeces and greywater, part I: results[J]. Water Science and Technology,2007,56(5): 239-249.
- [14] OLDENBURG M, PETER-FRÖHLICH A, DLABACS C, et al. EU demonstration project for separate discharge and treatment of urine, faeces and greywater, part II: cost comparison of different sanitation systems [J]. Water Science and Technology,2007,56(5):251-257.
- [15] WINKER M, SAASOUN A. Urine and brownwater separation at GTZ main office building Eschborn, Germany; case study of sustainable sanitation projects [M]. [S.l.]:Sustainable Sanitation Alliance,2011.
- [16] MALILA R, LEHTORANTA S, VISKARI E L. The role of source separation in nutrient recovery: comparison of alternative wastewater treatment systems [J]. Journal of Cleaner Production,2019,219(14):350-358.
- [17] THIBODEAU C, MONETTE F, GLAUS M. Comparison of development scenarios of a black water source-separation sanitation system using life cycle assessment and environmental life cycle costing [J]. Resources, Conservation and Recycling,2014, 92(11): 38-54.
- [18] THIBODEAU C, MONETTE F, GLAUS M, et al. Economic viability and critical influencing factors assessment of black water and grey water source-separation sanitation system [J]. Water Science and Technology, 2011, 64(12):2417-2424.
- [19] 李禾. 源分离技术:给水体减减肥[J]. 今日科苑, 2009, 13(7): 21-22. (LI He. Source separation technology: reduce weight loss to the water body [J]. Modern Science,2009,13(7):21-22. (in Chinese))
- [20] BESSON M, BERGER S, TIRUTA-BAMA L, et al. Environmental assessment of urine, black and grey water separation for resource recovery in a new district compared to centralized wastewater resources recovery plant [J]. Journal of Cleaner Production,2021,301(25):126868.
- [21] HUANG P, LIANG Z, ZHAO Z, et al. Synthesis of hydrotalcite-like compounds with drinking water treatment residuals for phosphorus recovery from wastewater [J]. Journal of Cleaner Production,2021,301(25):126976.
- [22] HUANG B, HE C, FAN N, et al. Envisaging wastewater-to-energy practices for sustainable urban water pollution control: current achievements and future prospects [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134(18):110134.
- [23] SPRIET J, MCNABOLA A, NEUGEBAUER G, et al. Spatial and temporal considerations in the performance of wastewater heat recovery systems [J]. Journal of Cleaner Production,2020,247(6): 119583.
- [24] HEMANDEZ L L, TEMMINK H, ZEEMAN G, et al. Characterization and anaerobic biodegradability of grey water [J]. Desalination,2011,270(1): 111-115.
- [25] ATANASOVA N, DALMAU M, COMAS J, et al. Optimized MBR for greywater reuse systems in hotel facilities [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193(9): 503-511.
- [26] PATEL A, ARKATKAR A, SINGH S, et al. Physico-chemical and biological treatment strategies for converting municipal wastewater and its residue to resources [J]. Chemosphere,2021,282(21):130881.
- [27] ABDALLA H, RAHMAT-ULLAH Z, ABDALLAH M, et al. Eco-efficiency analysis of integrated grey and black water management systems [J]. Resources, Conservation and Recycling,2021,172(13):105681.
- [28] 李云,何志琴,夏训峰,等. 国内外灰水处理技术研究进展[J]. 环境工程技术学报,2021,11(5):935-941. (LI Yun, HE Zhiqing, XIA Xunfeng, et al. Research progress of greywater treatment technology at home and abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5):935-941. (in Chinese))
- [29] 张健,高世宝,章菁. 真空便器与真空排水在节水和污水源分离中的应用[J]. 给水排水,2008,45(2):96-99. (ZHANG Jian, GAO Shibao, ZHANG Jing. Application of vacuum toilet and vacuum drainage in water saving and sewage source separation [J]. Water & Wastewater Engineering,2008,45(2):96-99. (in Chinese))
- [30] GARRIDO-BASERBA M, VINARDELL S, MOLINOS-SENANTE M, et al. The economics of wastewater treatment decentralization: a techno-economic evaluation [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(15): 8965-8976.
- [31] NAZARI S, ZINATIZADEH A A, MIRGHORAYSHI M, et al. Waste or gold? bioelectrochemical resource recovery in source-separated urine [J]. Trends in Biotechnology, 2020,38(9):990-1006.
- [32] LARSEN T A, PETERS I, ALDER A C. Peer reviewed: re-engineering the toilet for sustainable wastewater management [J]. Environmental Science & Technology, 2001,35(9):192-197.
- [33] 贾莹. 小球藻在源分离尿液中生长和去除氮磷的特性

- 研究[D]. 北京:清华大学, 2011.
- [34] 李继云. 黄水管道结垢特性分析及源分离排水系统构建研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [35] 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.
- [36] 徐康宁. 基于磷和钾回收的黄水资源化处理技术研究[D]. 北京:清华大学, 2011.
- [37] 徐露露, 刘辉, 叶文风, 等. 强化磷酸铵镁法回收源分离黄水中氮磷的试验研究[J]. 能源环境保护, 2020, 34(3): 29-37. (XU Lulu, LIU Hui, YE Wenfeng, et al. Experimental study on recovery of nitrogen and phosphorus from source separated urine enhanced by magnesium ammonium phosphate precipitation process [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(3): 29-37. (in Chinese))
- [38] 刘辉. 源分离黄水氮磷资源化利用研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(2): 6-8. (LIU Hui. Research progress on utilization of nitrogen and phosphorus in yellow water after source separation[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2021, 41(2): 6-8. (in Chinese))
- [39] 郝晓地, 叶嘉洲, 李季, 等. 污水热能利用现状与潜在用途[J]. 中国给水排水. 2019, 35(18): 15-22. (HAO Xiaodi, YE Jiazhou, LI Ji, et al. Status and potential applications of thermal energy from wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 15-22. (in Chinese))
- [40] HEPBASLI A, BIYIK E, EKREN O, et al. A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88(12): 700-722.
- [41] SHEN C, LEI Z, WANG Y, et al. A review on the current research and application of wastewater source heat pumps in China[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 6(2): 140-156.
- [42] MISZTA-KRUK K. Reliability and failure rate analysis of pressure, vacuum and gravity sewer systems based on operating data[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 61(3): 37-45.
- [43] 张健, 李孟飞, 李萌, 等. 负压排水技术在乡村污水收集中的应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 66-71. (ZHANG Jian, LI Mengfei, LI Meng, et al. Application of negative pressure (vacuum) drainage technology in collection of rural sewage[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 66-71. (in Chinese))
- [44] MOHR M, BECKETT M, SCHLIEBMAN U, et al. Vacuum sewerage systems: a solution for fast growing cities in developing countries [J]. Water Practice and Technology, 2018, 13(1): 157-163.
- [45] SHAFIQU L M. Comparative evaluation of vacuum sewer and gravity sewer systems[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017, 8(1): 37-53.
- [46] 丁梦雨, 康启越, 张释义, 等. 全国 23 个城市水源水中邻苯二甲酸酯代谢物浓度调查[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4205-4211. (DING Mengyu, KANG Qiyue, ZHANG Shiyi, et al. National survey of phthalate metabolites in drinking source water of 23 cities in China [J]. China Environmental Science, 2019, 39(10): 4205-4211. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-08-27 编辑: 施业)

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊, 针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题, 探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题, 主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985 年创刊, 经过 30 多年的努力, 《水资源保护》办刊成绩斐然, 目前是美国《工程索引》(EI) 收录期刊、中国科学引文数据库(CSCD) 来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊、华东地区优秀期刊, 同时被荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、波兰《哥白尼索引》(IC) 等数据库收录。

《水资源保护》长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊, 是国内较有影响的水利期刊之一, 主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊, 30 元/册, 全年共计 180 元, 每逢单月 20 日出版。邮发代号: 28-298。

地址: 210098 南京市西康路 1 号 电话: (025) 83786642

电子邮箱: bh1985@vip. 163. com; bh@hhu. edu. cn