



水资源保护
Water Resources Protection
ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV

《水资源保护》网络首发论文

题目：我国城镇生活污水源分离技术实施途径探究
作者：张金良，樊新颖，蔡明，高小涛，付健，马浩
网络首发日期：2022-02-09
引用格式：张金良，樊新颖，蔡明，高小涛，付健，马浩. 我国城镇生活污水源分离技术实施途径探究[J/OL]. 水资源保护.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20220208.1739.024.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

我国城镇生活污水源分离技术实施途径探究

张金良，樊新颖^{*}，蔡明，高小涛，付健，马浩

(1.黄河勘测规划设计研究院有限公司，郑州 450003；

2.水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室（筹），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开展了此项工作，本文基于生活污水源分离技术理念，首先系统梳理了国内外城镇生活污水源分离技术的研究进展；其次，在此基础上探究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，最后从生活污水源分离的始端（源分离器）—中端（输送系统）—终端（处理系统）探究了可适用于我国城镇的生活污水源分离、传输及处理技术，为今后更为科学合理地制定符合我国国情的新型城镇供排水系统模式提供了参考依据。

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 **文献标志码：**A

Research on the implementation of source-separation technology for urban domestic sewage in China // ZHANG Jinliang, FAN Xinying^{*}, CAI Ming,

GAO Xiaotao, FU Jian, MA Hao (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: In order to gain a deeper understanding of the feasibility of domestic sewage source separation technology in China, this paper first systematically reviews the research progress of domestic and foreign domestic sewage source-separation technology. Secondly, on this basis, it explored the potential for the utilization of black water, gray water, and yellow water resources after the separation of sewage sources. Finally, this article explores the domestic sewage source separation technologies that can be applied to my country's cities from the beginning (source separator)-middle (transportation system)-end (treatment system). It provides a reference basis for developing a new urban water supply and drainage system model that is more scientific and reasonable.

Key words: Sewage source-separation technology; Urban drainage system; Sewage recycling; Vacuum sewer system

基金项目：国家“十四五”重点研发计划课题（2021YFC3201302）

作者简介：张金良（1963-），男，教授级高级工程师，博士，主要从事水利水电工程设计研究。E-mail:jlzhangyrec@126.com

*通讯作者：樊新颖（1988-），博士后，主要从事城镇供排水系统模式研究。E-mail:fanxinying1234@126.com

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，这与我国推进污水资源化利用的指导意见、实现 2030 碳达峰和 2060 碳中和的目标背道而驰，使得我们不得不反思我国城镇排水系统的合理性。鉴于现有城镇排水系统所存在的不足，近年来欧美等发达国家逐渐提出生活污水源分离、按质处理理念以实现最大限度污水资源化，经相关研究表明^[6]生活污水源分离技术具有较大的节能减排潜力，可减少 N_2O 和 CO_2 排放量分别为 98%和 25%，从而使得污水处理厂能源消耗的间接排放量减少 20%，整体运行费用降低约 22%。目前，我国已有研究^[7-8]首先在农村地区探索实施生活污水源分离的可能性，但在城镇中还鲜有大规模应用的案例。这主要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是十分成熟，特别是黑水长距离输送技术等；其次对原有系统的分离改造难度较大，牵涉面广。因此，既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。本文旨在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所能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，为我国未来在城镇尺度实施生活污水源分离提供参考。

1 生活污水源分离技术基本原理及研究进展

（1）源分离技术内涵及原理

推荐对生活污水进行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，这导致现有排水模式不仅无法粪尿资源化，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。但是既有城镇人口密集，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城镇。为了解决既有城镇排水系统困境，德国、瑞士、瑞典等学者于 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。

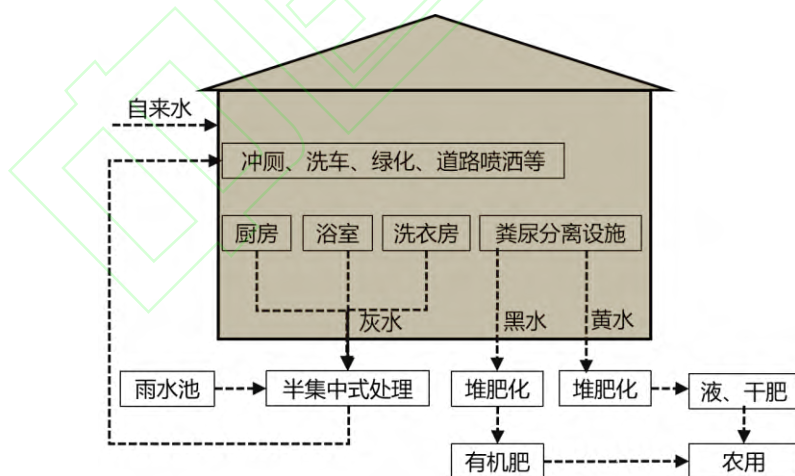


图 1 生活污水源分离技术基本原理

Figure 1 The principle of sewage source separation technology

（2）源分离技术的研究进展

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在德国杜塞尔多夫城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要高。2006 年，德国 GTZ 总部大楼为降低卫生间

用水采用了源分离技术^[15]，通过经济性评估显示总投资比传统系统多 8 万多欧元，但每年卫生间用水可降低近 5 千欧元。R.Malila^[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，其性能远远优于既有集中排水系统^[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在 2020 年—2025 年之间将在更大范围的城镇中进行试点建设运营^[12]。在我国，近年来源分离技术也逐渐在部分城市中开展工程试点。如北京奥林匹克公园^[19]也使用了源分离技术，对所分离出的黄水进行堆肥化处理利用。此外，还有研究在清华大学环能楼、鄂尔多斯生态小镇等地方尝试了源分离技术，重点集中于概念的引入，采用了粪尿分离器^[7]。综上，尽管源分离技术已经在部分城市进行了案例应用，但仍然缺乏从源头分离器、输送和处理系统的全过程较为完备的工程案例，并且各个案例所用技术均有一定的差异，还缺乏对其充分、系统地研究。

2 生活污水源分离技术所带来的能源回收潜能

生活污水资源化的利用途径主要分为三类：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、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，下文将重点讨论源分离后的污水资源化利用潜力。

(1) 灰水资源化

灰水是指洗手池、衣服清洗、淋浴、浴缸、厨房水槽等所收集的污水，其水量占用户总排水量的 50%~80%^[11]，当采用源分离技术后，其灰水比例达近 90%^[24]。由于灰水较传统生活污水相比，其污染物浓度降低，采用膜生物反应器 (MBR)^[25]、MBBR 工艺、曝气生物滤池 (BAF)、生物转盘 (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存其水质在地域差异性^[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《城市杂用水水质标准》(GB/T18920-2002)、《城市污水再生利用绿地灌溉水质》(GB/T 25499-2010) 等标准。有研究表明灰水再利用可减少城市用水约 25%~40%^[27]。灰水由于少了黑水和黄水提供碳源，导致灰水的碳氮较低，这是目前限制灰水资源化高效利用的主要因素^[28]。

(2) 黑水资源化

黑水指的是粪便污水，其水量占生活污水的 20%左右，采用粪尿分离真空便器后，其冲厕耗水量将减少 80%~90%^[29]。粪便长期以来都是绿色的有机肥，采用源分离技术后，收集的高浓度粪便污水资源化途径有与秸秆、餐厨垃圾通过生物发酵形成有机肥，或通过厌氧消化处理可用于沼气制作^[11]，进行资源化利用时需要满足《有机肥料》(NY525-2012) 和《大中型沼气工程技术规范》(GB/T51063-2014) 等标准。在整个源分离系统中，其资源化效益主要来自节水，其中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。

(3) 黄水资源化

黄水指的是尿液，其占生活废水总量的比例不到 1%，但它含有约 80%的氮（浓度约为 300mL/L，未稀释的尿液）、55%的磷和近 60%的钾资源^[31-32]，碳氮比小于 1（每人每天贡献 13 克 COD）^[33]，pH 值为 6.5 左右^[34]。通常，一个人每天平均产生 1.5 升尿液，其含有 11 克氮、1 克磷和 2.6 克钾，这表明它作为肥料的潜力。黄水经氧化、曝气生物滤池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氮^[31, 35]，回收到的氮、磷、钾资源可按照《农业用硝酸铵钙》(NY 2269-2012)、《尿素》(GB/T 2440-2017) 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的多少。有研究^[36]利用 PHREEQC 软件和 BioWIN 软件分析了磷和钾回收效果，结果表明磷和钾的回收率分别约为 78%和 90%。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]。

(4) 污水热能资源化

城市生活污水余热排放占据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，其具有非常大的余热利用潜力^[39]。对于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、供冷，污水源热泵的供热/冷 COP 约为 2.23~5.35^[40]，优于其他源热泵，如空气源热泵（COP=2.8~3.4）和地源热泵（COP=3.3~3.8），据估计全球已有 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。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、温室大棚等需要供暖的建筑中。污水热能资源回收利用时需按照《污水源热泵系统设计规范》（DB11/T 1237-2015）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 生活污水源头分类收集及传输系统实施技术

根据城镇规模、污水资源化利用程度，生活污水处理系统可以分为图 2 中的四类情况，本研究重点关注大型城镇、污水高度资源化回收技术，下文将分别从污水源分离器、污水传输系统和水处理系统角度探究合适的实施技术。

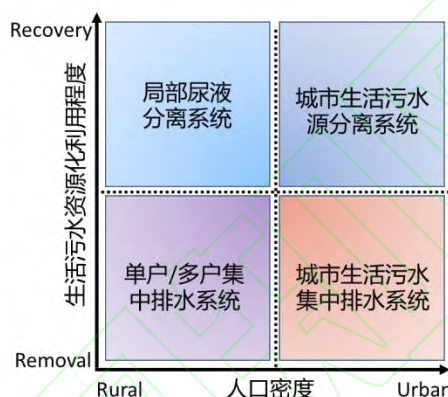


图 2 生活污水排放系统类型

Figure 2. Classification of wastewater management systems

(1) 污水源分离器——始端

根据污水资源化利用途径，一般分别收集灰水、黑水和黄水，其中灰水需直接建立灰水管道或采用目前的城市排水管道即可满足要求，而黑水和黄水需要采用尿液分离器实现分离后，再采用相应的管道系统即可实现对尿液分离传输。因此，黑水和黄水是否可以分离的关键在于采用什么样的尿液分离器，一般采用两个排放口，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（1L 空气）、干厕尿液分离器（0.5L 锯末）等^[11]。与传统便器（6L~8L 水）相比，尿液分离器实现了较大程度的节水^[30]。但是，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^[34]对此进行了系统研究，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。但是，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。

(2) 污水输送系统——中端

污水的输送系统，目前主要有三种形式：依靠重力作用传输、负压传输和压力传输，其一般都存在一定的故障率（维修时间），其分别为 58%（7.5h）、77%（2h）、86%（2h）。传统排水系统常采用重力流进行传输，一般需要考虑管道的坡度，长距离传输时需要增加中途增加泵。压力传输时采用给水泵增压产生的动力实现污水传输的系统^[42]。而负压传输系统最早时荷兰工程师 Lierunr 提出，但碍于当时技术的实施难度，管道很难保证负压，导致系统最终很好地运行。随着近年来负压技术的逐渐成熟，采用负压输送城市生活污水成为了可能^[43]，已有企业开始将该技术进行实践化，如万若（北京）环境工程技术有限公司。真空传输技术的复杂性和高成本对真空传输技术带来了消极方面，但真空传输技术具有浅沟、较小的管道以及因此减少挖掘而产生的安装成本较低等优势，如针对于平坦的地形、地下水位高的地区、水保护区和容易发生洪水的地区具有巨大优势。有研究^[44]对比了压力传输和负压传输的故障特点，结果表明压力输送系统的

大多数故障来源于水泵，而负压输送系统的较大故障来源于真空阀。通常人们认为负压输送系统具有更大的优势^[45]，它比重力传输和压力传输具有更大的独特性。目前世界上最大的负压排水系统在迪拜棕榈岛建成，由 40 公里的管道组成，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（包括水再利用、粪便资源化回收和沼气发电）的日益重要，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或新发展^[44]。有研究给出了根据负压管道的总长度和总提升高度给出了判断图，如图 3 所示。图 3 左上角区域可直接实施负压排水系统，而右下侧区域需要采用特殊设施才能安全的实施负压排水系统。

针对源分离技术，灰水可采用既有的重力系统进行传输，而黑水与黄水水量少，既有的重力系统已难以实现输送，如何选择输送方式成为了关键。黑水含固率高和流动性差，如采用重力传输系统将需要大量的泵站、高坡度，且易堵塞，故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时间^[34]。

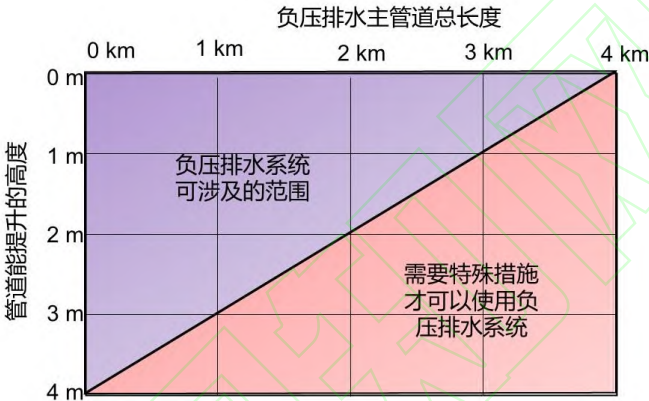
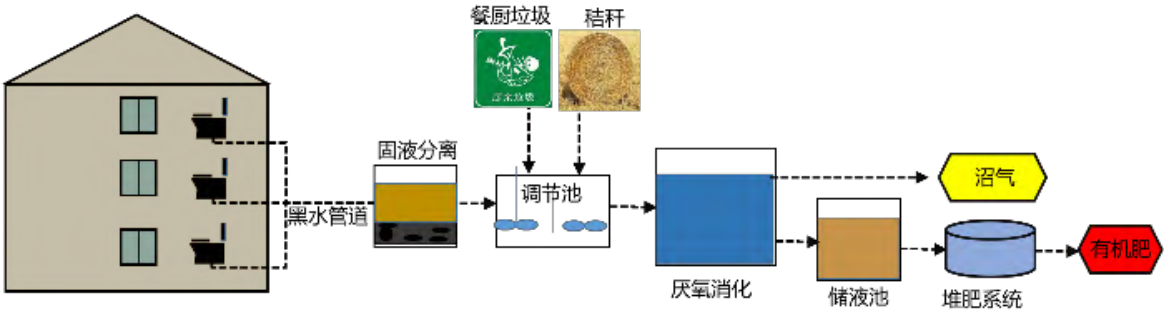


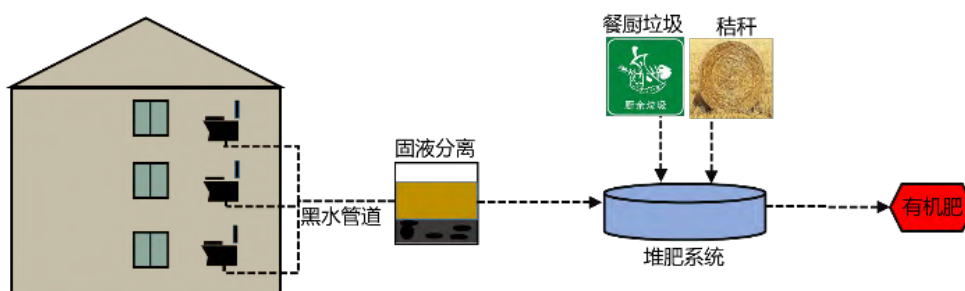
图 3 负压排水系统可行性分析图
Figure 3 Feasibility analysis of vacuum system

（3）污水处理系统——终端

生活污水源分离技术实施后所得到的灰水、黑水和黄水需分别单独处理。其中根据灰水水质特征^[46]，可采用传统污水处理系统，如膜生物反应器（MBR）、MBBR 工艺、曝气生物滤池(BAF)、生物转盘(RBC)、过滤技术、人工湿地等。上述灰水工艺的选择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取。对于黑水，目前国内外处理粪便常用的方法有化粪池处理、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、高温堆肥法等技术。其中粪便资源化的处理工艺主要有厌氧、好氧、厌氧-好氧处理技术。根据不同的处理目的，本文给出了具体工艺流程（图 4）。此外，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]。



(a) 沼气制作工艺流程



(b) 有机肥制作工艺

图 4 黑水资源化工艺流程

Figure 4 Black water resource conversion process

综上，对于生活源分离已有工程应用案例，从技术层面已基本可已实现。有研究表明生活污水源分离技术实施的大多数故障来源于用户使用不当所导致（约占 2/3^[42]），因此如需大范围推广使用还要增加社会公众对生活污水源分离技术的可接受度及进行使用技术培训，以保证用户能较好地帮助城市实现源分离。为使得生活污水源技术更好地实施，其负压阀门、粪尿分离便器、黑水和黄水管道防结垢技术、以及成熟配套的智能运维系统有待进一步开展专题研究。

4 生活污水源头分类收集及传输系统效益分析

为进一步阐述生活污水源头分类收集系统的效益，本研究以某 10 万人规模（20 个小区，每个小区 5000 人，日用水量 2 万 m³）的城镇为例进行了经济核算。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 16820m³/d，黑水处理规模为 380m³/d；所分离的灰水假设仍用原污水处理厂。该项目的总投入为 33600 万元，每年的运维费用约为 40.5 万元，整体收益为 2062 万元/年（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 16.2 年。目前，我国一些城市常住人口超 500 万，随着生活污水源分离技术应用规模增大则将大大减少投资回收期，并带来巨大的社会效益，对我国实现碳中和具有重要的现实意义。

表 1 生活污水源分离技术效益分析（10 万人为例）

Table 1. Benefit analysis of sewage source separation technology (100,000 people as an example)

项目的投资、运维、效益		原排水系统/万元	生活污水源分离系统/万元	费用比较/万元
初期投资	生活杂用排水系统	13800	9800	
	公厕废水排水系统		7800	
	沼气厂		8000	27800
	有机肥厂		8000	
运维费用	原料费用 有机肥制作时黑水与秸秆耗材比例为 10:1，本项目约需要 10 吨/年，秸秆每吨 500 元		0.5	40.5

动力费用		处理厂需 20 个人参与系统的运行管理，每人每月工资 4000 元	40
效益分析	节水效益	黑水（节水约 6 万m ³ /年，水价 5.95/m ³ ）	35.7
		灰水（节水约 300 万m ³ /年，水价 5.95/m ³ ）	1785
	节能效益	节约药剂 12 万元/年（每年可减少PAC10.95 吨、PAM10.95 吨）	12
		减少除氮除磷用电约 180 万kW·h	109.8
		复合肥（每年 2090 吨，价格 800 元/吨）	167.2
经济效益		沼气（每年 800 吨，价格 3.5 元/Nm ³ ）	28
		大气：减排N ₂ O 0.9 吨/年，CO ₂ 398 吨/年，CH ₄ 20.4 吨/年	
	环境效益	水体：减少氮 365 吨/年、磷 125 吨/年、钾 130 吨/年	
		土壤：污泥减少 1.8 万吨/年，节省填埋空间 1.0 万m ³ /年	

注：水价和电价是按郑州市计算的。

5 结论与展望

城镇生活污水源分离技术是未来绿色城镇发展的必然方向。本文系统地分析生活污水源分离技术的发展背景、资源化途径及实施技术途径。为更好的推动源分离技术的实施提出如下建议：

- （1）进一步研发绿色、节能、节水、节碳的生活污水源分离器、污水输送技术、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，并研究及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。
- （2）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试点示范，进行全流程示范（规划、设计、建设、运营）和全生命周期评价（经济、节能、节水、节碳、资源化、使用寿命等），形成一套完备的技术实施方案及评价体系，以便于未来在其他城镇中进行应用，尤其是新建城镇。

6 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(S1): 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& Waste Water Engineering*. 2020, 56(S1): 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. *Process Safety and Environmental Protection*[J]. 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, Meier 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] A P, L P, A B, et al. EU demonstration project for separate discharge and treatment of urine, faeces and greywater--part I: results[J]. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 2007, 56(5): 239-249.
 - [14] M O, A P, C D, 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: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 2007, 56(5): 251-257.
 - [15] Winker, Saadoun. Urine and brownwater separation at GTZ main office building Eschborn, Germany[Z].Case study of SuSanA projects, 2009-6-29.
 - [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] C T, F M, M G, et al. Economic viability and critical influencing factors assessment of black water and grey water source-separation sanitation system[J]. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 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(07): 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-Barna 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] Hernández Leal 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 & Waste Water 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] Peer Reviewed: Re-engineering the toilet for sustainable wastewater management[J]. *Environmental Science & Technology*. 2001, 35(9): 192A-197A.
- [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]. 清华大学, 2011.(JIA Ying. Study on growth of *Chlorella vulgaris* and removal of nitrogen and phosphorus in source-separated urine[D]. Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [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]. 清华大学, 2015.(LI Jiyun. Analysis on the scaling character of urine pipe and study on the construction of source separation drainage system [D]. Tsinghua University, 2015. (in Chinese))
- [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]. 清华大学, 2011.(XU Kangning. Combined treatment processes of yellow water: aiming to recover phosphorus and potassium[D]. Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [37] 徐露露, 刘辉, 叶文凤, 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(03): 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(02): 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(02): 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, Schließmann 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] Islam M. Shafiqul. 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))