

文章编号: 1007-2284(2020)08-0020-05

农村分散式生活污水源分离技术现状 与发展趋势分析

张奇誉^{1,2}, 刘来胜²

(1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 我国农村生活污水因污染面广、产量大、增长快、收集难度大等特点, 目前已经成为农村水环境综合整治面临的突出问题。从已有工程实例来看, 城市集中式管网收集处理模式并不适用于农村相对分散的实际情况, 我国在农村分散污水处理模式上已经逐步向“处理、就地回用”方向转变。源分离技术具有资源和能量循环利用的生态内涵, 是农村分散生活污水处理技术体系的有益补充。本文通过对我国农村生活污水特点、源分离技术的原理和发展历程、源分离技术的分类及其短板等分析, 对该技术在面向资源化的农村污水处理需求中的应用前景进行了探讨。

关键词: 农村生活污水; 源分离; 分散处理; 资源化; 中水回用

中图分类号: TV93; TU992.3 文献标识码: A

An Analysis of the Current Situation and Development Trend of Rural Decentralized Domestic Sewage Based on Source Separation Technology

ZHANG Qi-yu^{1,2}, LIU Lai-sheng²

(1. School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Due to its wide pollution, large output, rapid growth and difficult collection, rural sewage in China has become a prominent problem in the comprehensive improvement of rural water environment. From the existing engineering examples, the urban centralized pipe network collection and processing model is not applicable to the relatively scattered rural reality. China has gradually shifted to the direction of “distributed treatment and local reuse” in the rural decentralized sewage treatment model. The source separation technology has the ecological connotation of resource and energy recycling, and will be a useful supplement to the rural dispersed domestic sewage treatment technology system. Through an analysis of the characteristics of rural domestic sewage, the principle and development history of source separation technology, the classification of source separation technology, and the short board of source separation technology, the application prospect of this technology in resource-oriented rural sewage treatment demand are discussed.

Key words: rural domestic sewage; source separation; dispersion treatment; resource utilization; water reuse

0 引言

根据国家统计局 2017 年发布的人口统计数据, 我国农村人口有 57 661 万人, 占总人口的 41.48%, 农村人口基数庞大。

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目“生活污水处理技术研发与示范”(2018YFC0408103)。

作者简介: 张奇誉(1995-), 男, 硕士研究生。E-mail: 125535589@qq.com。

通讯作者: 刘来胜(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 从事水处理和河流生态修复工作。E-mail: liuls112@126.com。

随着我国社会经济的高速发展, 农民的生活水平得到了极大提高, 其生活方式也发生了巨大变化, 卫生洁具的革新和自来水的入户使得农村生活污水排放量急剧增加。农村生活污水的无序排放, 以及未经处理的粪便随意堆放严重污染了水环境和土壤环境, 成为农村环境的重要污染源。2016 年, 我国农村污水处理率不足 22%, 污水排放量达到 202 亿 t, 预测到 2020 年可达到 300 亿 t, 污水排放量体量巨大, 污水处理的市场需求旺盛。

我国农村生活污水一般分成两类: 一类是由厨房用水、家庭洗涤和日常洗漱等产生的灰水, 占农村生活污水总量的 50%~80%, 主要为有机和无机污染物, 污染程度低^[1]; 一类是由人体排泄物和冲洗用水等产生的黑水, 包含了黄水和棕水, 主要

为生理污物,几乎含有生活污水中所有的氮、磷、钾等营养物质^[2],污染物质和病原菌含量高,后续处理要求高。我国农村生活污水对流域水环境磷的贡献率达到8%,对氮的贡献率达到10%^[3]。相对于城市污水,农村生活污水具有随机性和波动性,不同时段排放量波动明显,属于典型的间歇排放,日变化系数一般在3.0~5.0之间^[4]。城市污水处理厂建设费用昂贵,需要配套大量的管网收集系统,仅建设一个中等的处理厂就要耗费上亿元资金^[5]。我国农村呈现“大聚居,小分散”的特点,集中式的城市污水处理模式不适用于管网设施与基础设施建设落后的农村^[6]。

目前,我国农村水环境自然修复体系已经遭到了破坏,农村水环境的整治重点在于如何能够在经济发展与环境保护之间找到平衡点^[7]。农村分散式生活污水源分离技术从资源重复利用和污染负荷源头消减的角度探寻农村水环境治理的新出路,不仅能够从源头削减生活污水排放量,降低后续处理工艺的难度与能耗,而且还能够资源回收再利用,适合我国农村生活污水分散治理与粪尿资源还田的实际需求。源分离技术在我国的应用实例已经越来越多,如移动床生物膜反应器(MBBR)处理校园混合灰水、UASBST反应器处理真空马桶收集的高浓度污水、利用鸟粪石回收磷等^[8]。

1 源分离技术的产生与发展历程

粪便和尿液体积仅占生活污水总量的约1%~2%,却是生活污水中主要污染负荷,含碳有机物占总量的60%、氮和磷占总量的90%以上、钾占总量的60%~70%以及,以及绝大部分的大肠杆菌^[9]。随着可持续发展理念的普及以及居民对生态环境的要求日益提高,现行的污水混排方式和集中式污水处理厂的局限性日益凸显,如水资源浪费、排入水体导致富营养化、后续处理工艺高耗能高投资、氮磷钾资源未回收、产生的污泥难以处理等等^[10]。相对于混合污水,体积小但浓度高的黑水单独收集并处理,更容易实现资源化^[11]。从生态环境保护的角度考虑,源头分离比末端混合后处理更加合理^[12],国内外已经开始从末端集中处理逐步转向源头分离处理^[13]。源分离技术并不改变原有的便器或者排水设施的主体结构,只是在原有结构的基础上加以改进,实现黑水和灰水、尿液和粪便源头分离^[14]。源分离技术的核心理念是通过源分离技术将生活污水在源头进行分离后,后续加以处理后利用,其关键部分是粪尿分离、灰水与黑水分离、后续污水处理以及资源回收利用。

1973年,真空厕所系统由美国波音公司研发并且投入使用,这也是最早应用源分离技术到实际生产的例子之一,但由于其单套高额的设备成本,推广难度很大。1985年,Uno Winblad先生在《Sanitation With-out Water》一书中明确提出“粪与尿不要混合,粪不要与水混合”的粪污处理思想,这是源分离技术近现代的早期理念^[15]。近代最早的源分离实体装置始于20世纪90年代中期,学者Kirchmann等介绍了在没有污水管网铺设的瑞典部分农村,为了控制氮磷的污染而建设的粪尿分离式厕所,希望通过该工艺对人体的排泄物进行就地源分离并处理利用,减轻对水体的污染^[16]。20世纪末,欧洲一些学者相继提出了分散排水与再利用、替代排水、可持续排水、生态排水等新

概念,将粪尿与生活杂排水分离并进行能量和资源的回收^[17]。2000~2006年,瑞士联邦水科学与技术研究所完成了一项名为Novaquati的研究项目,该项目针对尿液分离技术和消费者接受度等相关内容进行了研究。荷兰的源分离研究正蓬勃开展,目前约有20多个试点工程。

我国自农耕文化起,粪便就作为农家肥返田再利用,这样的生活、生产方式在我国已盛行了几千年,是生态排水理念的先驱,也是我国应用源分离技术的雏形。近几年我国关于农村分散式生活污水源分离技术应用越来越广泛,如贾海峰以我国北方某典型的居民小区为对象^[18],证明了负压源分离排水系统具有很好的生态效益;清华大学中意节能环境楼验证了源分离排水系统技术指南的可行性^[19];北京市奥林匹克森林公园应用源分离系统,处理后的棕水和黄水再用于景观河流或植物灌溉,节约了大量水资源,形成了小型的生态闭合圈^[20]。

2 农村分散式生活污水源分离处理技术分类

2.1 农村源分离生态厕所

农村源分离生态厕所是指从源头入手,将便器升级为粪尿分离装置,将粪尿通过分别的排泄口进行收集,储存于对应的储尿箱和储粪池中,最后再加以处理。目前农村源分离生态厕所存在以下几种基本类型:

(1) 免冲水式堆肥干厕。其核心为便池和堆肥箱,原理在于将排泄物统一收集至堆肥箱与基质充分混合,由好氧微生物降解为 CO_2 、 H_2O 及有机粪肥^[21]。该类厕所源于我国农村传统旱厕,区别在于尿液与粪便能够分开收集,是一种新型生态旱厕,其主要处理工艺即在堆肥箱中加入锯末、食物垃圾等,使粪便充分发酵堆肥。该类厕所在欧美地区,以及我国农村地区已经有很多实际应用,如赵军营等在马家方庄示范应用了粪尿分集式厕所与堆肥池^[22],将粪便统一收集产能,处理过后的尿液用于农田滴灌,效果良好。

(2) 尿液分离式冲水厕所。主体构造是粪尿分离收集,优势在于节省水量。以3/6升的节能型抽水马桶为例,一个三口之家使用抽水马桶就要消耗水90 L/d,一个月耗水量为2.7 m^3 。而对粪尿分离式冲水厕所的用水量进行了测算,尿液冲水耗水量为0.2 L/次,粪便冲水耗水量仅为0.7 L/次^[23],用水量仅为抽水马桶的7%。

(3) 负压厕所或真空厕所。其原理是利用真空泵或高压泵形成污水管道内负压或真空环境,将便器内的污水抽集到储蓄池内,消耗的水量仅为普通节水马桶的1/3,并且分离得到的粪尿资源浓度高、污水量少。如河北省邯郸市某村庄厕所改造示范工程,该村庄应用负压排水源分离技术,粪尿分离后分别进入沼气池和人工湿地处理,得到的沼气用于发电发热,而尿液处理后达标回用^[24]。

农村源分离生态厕所与农村传统厕所相比,其优势在于符合我国目前的资源形势,充分做到了节约水资源、降低能耗以及资源回收利用,对于改善我国农村生活生态环境也有重大意义。

2.2 农村生活污水分类处理系统

农村生活污水分散处理系统的模式是“一户一套,联户处

理”其投资和管理的成本大大降低,并且产生的粪尿资源就地处理后,可以交由有机肥加工厂,并给予住户一定的补贴,系

统如图1所示,特别适用于经济欠发达地区。

奥地利为了实现中水回用,兴建了尿液源分离便器和灰水

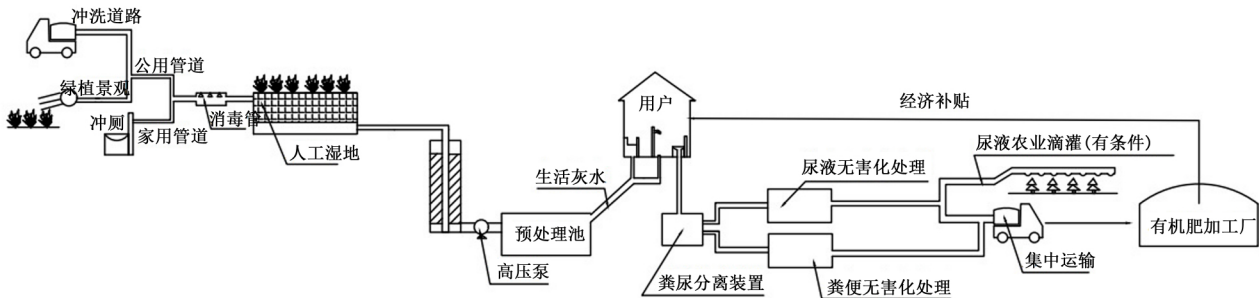


图1 农村生活污水源分散型处理系统

Fig.1 Rural domestic sewage source decentralized treatment system

处理综合系统,粪便和家庭灰水经过预处理后,粪便堆肥还田,而家庭灰水则由半地下式人工湿地二次处理后排出。我国国内近年来也涌现了一批相对成熟的农村生活污水源分离系统,如北京建筑工程学院在昌平区小汤山附近兴建了一处生态循环示范基地^[25],该示范基地包括生态厕所、粪便尿液能源回收、灰水和雨水处理回用等。粪便进入沼气池产生的能量可以用作路灯、供暖等;尿液收集处理后,则可浓缩处理后做有机肥的混合材料。基地内收集的灰水与雨水可经由配套的人工湿地处理,得到的中水用于景观喷洒、冲洗等。在这个系统内,能量可以得到充分的循环和利用,符合生态理念与可持续发展理念,是一个典型的生态绿色工程。

3 农村分散式污水处理中源分离技术短板分析与建议

源分离技术由于其就地处理就地回用的理念,既能资源能量循环利用,又可以减少长距离输送的能耗和渗漏风险,非常适用于我国广大农村分散居住的实际情况,但是由于该项技术发展相对滞后,目前仍存在以下4个方面的不足。

(1) 应尽快出台相应的系统化处理技术方案。尽管分散处理存在诸多优点,但污泥回收、化粪池清掏、尿液回用等后续运维问题如何妥善解决,防止二次污染是一个重点问题。建议尽快出台相应的技术指南和系统的流程处理方案。

(2) 应重点破除源分离技术的成本壁垒。源分离技术一直广为诟病的就是其经济效益差,前期需要布设分质污水收集设备与分质收集管道,后续也需要投入人力资金去维护运行。随着技术革新,比如膜技术、负压分离技术的发展^[26],源分离技术已经具备一定的经济竞争力。如我国北方某典型的居民小区,应用了源分离的负压收集系统,结果表明,与传统排水系统相比,负压源分离排水系统的管道工程建设成本增加231.2万元,管道系统运行费用每年可减少16.6万元;污水处理设施建设投资减少88.9万元,运行费用每年可节省20.7万元。虽然TOVE A等^[27]学者认为这种方法在城市化地区和工业化国家也可以使用,但是不可否认,该项技术还不具备大面积推广的基础,如何有效降低设备和运行成本,是关乎源分离技术发展的核心问题。建议在突破技术壁垒降低成本的同时,探索农村

生活污水治理的PPP模式。我国农村污水治理市场仍是一片蓝海,农村污水治理应充分发挥市场机制,吸引社会资金的同时,政府试行推广农村水环境排污费改税的可能性。

(3) 应重视资源回收利用过程中存在的次生问题。通过利用源分离技术可以有效减少氮磷等营养盐进入水体^[28]。通过ORWARE模拟软件评估了源分离在污染物减排方面的作用^[29],结果显示:当尿液分离率达到65%时,污水中的氮、磷负荷可分别降低55%和33%;当尿液分离率达到100%时,出水中的氮浓度可降低80%~85%,磷浓度可降低50%。虽然源分离技术优势明显,但是高浓度的尿液对于收集管道、后续处理工艺的要求较高,比如尿液在微生物水解后,导致管道内污水pH值上升,促使含磷化合物发生沉淀,容易堵塞管道。建议一方面探索资源回收利用市场化机制;另一方面开展相关科学研究,如适用于高浓度污水的设备管材研发。

(4) 应进一步强化源分离技术的运行维护管理。源分离技术从目前的小规模工程示范到大规模推广应用还有很长的路要走。一项关于澳大利亚、丹麦、德国、卢森堡非混合马桶试点项目的研究表明,虽然居民愿意接受生活污水源分离处理模式,但不能忍受运行过程中产生的一些问题,如堵塞、臭味或需要较长的冲洗时间。目前,国内对源分离技术的运行管理方面的研究也相对较少,关注热点往往在于处理效果、能源回收等方面,如“瑞典-中国鄂尔多斯生态卫生城镇项目”没有考虑到后续居民使用中的堆肥问题、北方冬季管道结冰冻裂问题、臭味处理问题等,使得项目报废。建议建立有效的用户反馈机制、建管结合,做到实效化与常态化有机统一。

4 源分离技术在构建面向资源化的农村分散污水处理模式中的应用前景分析

在构建面向资源化的农村分散污水处理模式中,其技术关键是如何利用源分离技术更加高效率、低能耗地实现资源回收,保证源分离技术长久地可持续运行,目前存在5个研究方向。

(1) 灰水资源化回收利用。相对于黑水,灰水所含污染物的类型和含量均较少,主要为一些生物的易生物降解有机物、氮磷营养盐、微生物和其他基本水化学成分^[30],但也有研究表

明灰水中可能含有微量的重金属物质^[31],因此,回用途径不包括人体直接接触的水源。目前,灰水主要回用于冲厕和绿化灌溉,回用于冲厕或浇灌可节约家庭用水总量的30%~50%。有研究表明,灰水回用于冲厕可使家庭人均日用水量减少40~60 L,可节约城市用水量的10%~25%,对节约水资源具有很大作用^[32]。

(2) 尿液资源化回收利用。尿液中含有大量的氮磷营养物质,氮磷含量达到78%和50%以上,尿液资源化回收利用可以有效缓解我国目前的水体富营养化。目前,尿液中的氮磷回收技术主要包括:磷酸铵镁沉淀^[33]、混合阴离子交换等磷回收技术;物理脱水、吹脱吸收、离子交换吸附等氮回收技术;硝化和电化学技术等^[34];膜处理、生态处理等生态盐回收技术^[35]。目前,主流的回收技术是尿液还田,有的地区通过向尿液中加入醋酸调节pH值后直接用于农田滴灌。

(3) 粪便资源化回收利用。粪便中主要含有一些难降解的有机物、微生物病原体、磷、钾等。粪便在源分离除水处理后,含有的微生物病原体存活率大大降低,充分发酵处理后可以作为有机肥的混合材料之一进行再利用,发酵产生的甲烷气体也可以回收利用于发电发热。目前主要处理工艺有化粪池、沼气池、堆肥池等。由于化肥施用具有方便、高效的特点,粪便还田普及率越来越低,主要是缺乏相应的补贴或激励措施,以四川省丹棱县为例,已经形成了“居民-肥料-厂家”的有效补贴模式。

(4) 再生水资源回收利用。生活污水处理后再生回用可以优化区域水资源配置,降低区域供水压力,实现区域水资源“经济-生态-社会”效益的最优化。中水回用在很多发达国家应用广泛,如日本部分城市中设有生活用水、工业用水及杂用水三种供水系统;法国巴黎市区有饮用水和专供清洗街道用的非饮用水有两套供水系统,分别供应景观街道使用和居民直接饮水使用;美国在多个州建设了分质供水系统,分为饮用水系统和非饮用水系统。我国许多大中型城市如杭州、南京、湖州、苏州等部分住宅小区,也已开始实施双管供水^[36]。目前,中水回用系统也开始应用于我国北方农村地区,以榆林市古塔乡黄家圪崂村为例,已经形成了完整的村庄中水回用系统^[37]。

(5) 保障源分离技术可持续运行。源分离技术目前应该建设相对应的技术评估体系,评价其分离效果参数、处理效果参数、环境影响参数、经济影响参数、生态效益参数,验证其源分离技术方案是否可行,以便向社会提供客观真实的运行数据。参照新西兰区域议会的方式,建立运行数据库,并将用户反馈意见纳入其中,给后续工程作为参考依据。

5 结 语

当前,我国以建设文明生态村为目标的社会主义新农村建设目前正如火如荼地进行。农村水环境治理是农村生态文明建设的重要组成部分,对于改善农村人居环境,保障民生具有重要意义^[38]。我国农村生活污水的水质、水量和地方经济条件有别于城镇,无法照搬传统的集中式污水处理模式。基于源分离的农村分散式生活污水处理技术充分实现了节约水

资源、减少能耗、防止污染排放,适合我国农村经济相对落后的实际情况,满足了我国目前农村水环境需求。从目前国内普及情况来看,源分离技术具有较好的普适性,能够适合我国不同农村的特点,为我国农村生活污水处理提供了一条可持续发展的道路,具有较好的应用前景^[39]。建议今后在农村生活污水源头分质收集、处理工艺、资源化回收利用等方面开展深入研究,进一步拓展该技术的理念内涵,丰富和完善技术工艺,形成一套完整的基于源分离技术的农村分散式生活污水处理模式,建立系统的源分离技术评估和反馈体系,实现物质(水资源)和能量(粪便和尿液)的循环利用,从而为新农村生态建设提供技术支撑。 □

参考文献:

- [1] RIDDERSTOLPE P. Introduction to greywater management [J]. Eco-San Res Publications Series, 2004(4): 13-24.
- [2] SCHONNING C. Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source-separated human urine [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2001(2): 534-543.
- [3] 崔志峰,王凯军,宋英豪,等. 村镇生活污水控制技术研究 [C] // 中小城镇市政污水处理工程技术工艺高级研讨会, 2005(11): 5-8.
- [4] 董瑞海,顾宝群,张博雄,等. 基于源分离的农村污水生态治理模式与技术 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 209-212.
- [5] 李云飞. 城市污水处理工艺技术现状研究 [J]. 节能与环保, 2019(6): 91-92.
- [6] 冯华军. 分散式生活污水处理工艺开发及机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [7] 朱叶琴,葛雯君. 农村生态环境现状基础性问题调查及对策: 基于江苏省苏南地区部分农村的调查分析 [J]. 中国集体经济, 2019(8): 6-7.
- [8] 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.
- [9] LANGERGRABE G, MUELLGGERA E. Ecological Sanitation—a way to solve global sanitation problems? [J]. Environment International, 2005, 31: 433-444.
- [10] 刘文英,刘坚,胡正义. 城镇人粪尿和生物垃圾资源化新途径: 构建生活污染物源分离和利用技术系统 [J]. 科技信息, 2010(1): 414-415.
- [11] JONSSON H, STENSTROMT A, SVENSSON J, et al. Source separated urine nutrient and heavy metal content, water saving and faecal contamination [J]. Water Sci Technol, 1997, 35: 145-152.
- [12] UDERT K M, BUCKLEY C A, Wchter M, et al. Technologies for the treatment of source-separated urine in the eThekwin Municipality [J]. Water S.A, 2015, 41(2): 212-221.
- [13] 赵军营. 源分离农村卫生厕所重水灌溉利用技术研究 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
- [14] 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.
- [15] 王俊起,孙凤英,王友斌,等. 粪尿分集式厕所设计及粪便无害化效果评价 [J]. 中国卫生工程学, 2002, 1(1): 5-9.
- [16] KIRCHMANN H. Human urine—chemical composition and fertilizer

- use efficiency[J]. *Fertilizer Res*, 1995, 40(2): 149-154.
- [17] 张健,高世宝,章菁.生态排水的理念与实践[J].中国给水排水,2018,24(2):10-14.
- [18] 贾海峰,王军,张健,等.居住区负压源分离系统与传统排水系统的比较[J].中国给水排水,2014,30(11):131-134.
- [19] 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.
- [20] 张驰,徐康宁,苏冯婷,等.国外源分离排水工程项目概述[J].中国给水排水,2015,31(2):28-33.
- [21] 李慧,付昆明,周厚田,等.农村厕所改造现状及存在问题探讨[J].中国给水排水,2017(22):13-18.
- [22] 赵军营,任培培,徐学东.源分离农村卫生厕所冲水灌溉利用技术研究[J].安徽农业科学,2014,42(16):5175-5185.
- [23] 原林,王宏哲,盛连喜.生态卫生系统的开发与应用:浅谈生态厕所的发展[J].中国资源综合利用,2007,25(2):30-33.
- [24] 黄碧捷.生物预处理与“分质供水”[J].水处理信息报导,2006(5):1-3.
- [25] QIU FG, ZHANG DY, LI JQ, et al. Practice of ecological sanitation (ECOSAN) in Beijing: a demon-project[C]// Proceedings of 2009 International Conference on Sustainable Water Infrastructure for Cities and Villages of the Future. Beijing: IWA Publishing, 2009.
- [26] DI GIANO F A, ANDREOTTOL G, ADHAM S, et al. Membrane bioreactor technology and sustainable water[J]. *Water Environ. Res.*, 2004, 76(3): 195-196.
- [27] LARSEN T A, ALDER A C, EGGEN R I L, et al. Source separation: will we see a paradigm shift in wastewater handling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(16): 6121-6125.
- [28] 刘文英,陆根法,钱新,等.生态厕所与湖泊富营养化控制[J].环境污染与防治,2004,5.
- [29] JNSSON H. Urine separating sewage systems—environmental effects and resource usage[J]. *Water Sci Technology*. 2002, 46(6-7): 333-340.
- [30] ERIKSSON E, AUFFARTH K, EILERSEN A M, et al. Household chemicals and personal care products as sources for xenobiotic organic compounds in grey wastewater[J]. *Water S A. Willi Gujer*, 2007: 223-240.
- [31] 刘玲花,张盼伟,王启文.灰水水质、处理及回用技术研究综述[J].水利水电技术,2019,7(1):1-14.
- [32] 王少勇,陈洪斌.灰水处理与回用进展[J].中国沼气,2007,25(6):5-9.
- [33] 林亲铁,刘国光,尹光彩,等.磷酸铵镁法回收污泥浓缩液中氮磷的影响因素研究[J].环境工程学报,2010,4(9):2030-2032.
- [34] 任仕廷.两极循环电化学系统耦合微生物燃料电池回收污水中氮磷[D].北京:清华大学,2017.
- [35] 仇付国,徐艳秋,卢超,等.源分离尿液营养物质回收与处理技术研究进展[J].环境工程,2016,11(4):18-22.
- [36] 黄碧捷,陈书雪.生物预处理与城市分质供水[J].中国环保产业,2007(9):37-39.
- [37] 沙萌.中水回用技术在陕北地区农村给排水建设中的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2014.
- [38] 王学文,曹少飞,王慧娟,等.我国农村水环境污染现状与治理措施的思考[J].可持续发展,2016(6):58-60.
- [39] 杨艳,张健.源分离:节水与污水资源化的替代方案[J].中国环保产业,2018(4):42-45.
- [83] MONGKOLTHANARUK W, DHARMSTHITI S. Biodegradation of lipid-rich wastewater by a mixed bacterial consortium[J]. *International Biodeterioration Biodegradation*, 2002, 50(2): 101-105.
- [84] MADSEN E L. Determining in situ biodegradation: Facts and challenges[J]. *Environmental Science and Technology*, 1991, 25(10): 1663-1672.
- [85] 刘兰.污染水体的曝气和化学氧化组合修复试验研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- [86] LI X, HU H Y, YANG J. Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolated freshwater microalga, *scenedesmus* sp. lx1, growing in secondary effluent[J]. *New Biotechnol*, 2010, 27(1): 59-63.
- [87] 茹霞.富营养化水体除磷技术的研究进展[J].广东化工,2017,44(23):100-114.
- [88] HUNG L, DU S, LIN F, et al. Microbial activity facilitates phosphorus adsorption to shallow lake sediment[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2011, 11(1): 185-193.
- [89] 徐会玲,唐智勇,朱端卫,等.菹草、伊乐藻对沉积物磷形态及其上覆水水质的影响[J].湖泊科学,2010,22(3):437-444.
- [90] 王丽卿,许莉,陈庆江,等.鲢鳙放养水平对淀山湖浮游植物群落影响的围隔实验[J].环境工程学报,2011,5(8):1790-1794.

(上接第19页)

- [75] 钟继承,刘国锋,范成新,等.湖泊底泥疏浚环境效应:IV.对沉积物微生物活性与群落功能多样性的影响及其意义[J].湖泊科学,2010,22(1):21-28.
- [76] 薄涛,季民.内源污染控制技术研究进展[J].生态环境学报,2017,26(3):514-521.
- [77] 周子振,黄廷林,李扬,等.扬水曝气器对水源水库水质改善及沉积物控制[J].中国环境科学,2017,37(1):210-217.
- [78] 李新贵,孙亚月,黄美荣.城市水环境的修复与综合治理[J].上海城市管理,2017,26(4):12-18.
- [79] 侯翠荣.高藻高有机污染水源水处理技术研究[D].济南:山东大学,2008.
- [80] PREPAS E E, BABIN J, MURPHY T P, et al. Long-term effects of successive $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3 treatments on the water quality of two eutrophic hardwater lakes[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 46(8): 1089-1103.
- [81] YAMADA T M, SUEITT A P, BERALDO D A, et al. Calcium nitrate addition to control the internal load of phosphorus from sediments of a tropical eutrophic reservoir: microcosm experiments[J]. *Water Research*, 2012, 46(19): 6463-6475.
- [82] 胡小贞,金相灿,卢少勇,等.湖泊底泥污染控制技术及其适用性探讨[J].中国工程科学,2009,11(9):28-33.