

污水处理与回用

孔进,张百德,宋玉亮.农村分散生活污水治理技术探讨[J].净水技术,2021,40(4):56-61.

KONG J, ZHANG B D, SONG Y L. Discussion on decentralized domestic sewage treatment technologies in rural areas[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(4):56-61.



扫我试试?

农村分散生活污水治理技术探讨

孔进¹,张百德²,宋玉亮²

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院,山东济南 250101; 2. 潍坊市市政工程设计研究院有限公司,山东潍坊 261000)

摘要 通过对农村污水排放规律和污染特征的分析,针对大部分农户居住地分散、污水不易集中收集的特点,提出组团处理模式,将相邻家庭的污水收集到一起共同处理,该方法既可以均化水量和水质,还可以降低污水处理设施的运营和维护成本。另外,主张农村厕所采用源分离排水系统,从源头对黄水、褐水进行分类收集,再通过技术手段回收其中的营养物质用于肥田。同时,阐述了目前常见的农村污水处理技术,并指出低耗是农村污水处理发展的主要方向,处理工艺应力求简单,便于维护管理。

关键词 农村生活污水 分散污水处理 源分离排水系统 资源回收 堆肥

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2021)04-0056-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.04.011

Discussion on Decentralized Domestic Sewage Treatment Technologies in Rural Areas

KONG Jin¹, ZHANG Baide², SONG Yuliang²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Weifang Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract The characteristics of rural sewage discharge and pollution were analyzed. According to the characteristics of scattered houses and difficulties in collecting sewage in rural areas, a group treatment mode was proposed. Some sewage from neighboring families could be collected and treated together. This mode has some advantages, such as adjusting the sewage quantity and quality, reducing the cost of operation and maintenance. Otherwise, source-separated drainage system in toilets in rural areas are also recommend, in which yellow and brown water is collected separately in order to recycle the nutrients efficiently to the farmland. At last, the traditional technologies for wastewater treatment in rural areas are summarized. The new technologies for wastewater treatment in rural areas in the future would be focused on the simple and flexible processes, with the advantages of low construction, maintenance and operation costs.

Keywords rural domestic sewage decentralized sewage treatment source-separated drainage system resource recovery compost

据统计,2018年我国乡村常住人口为5亿6401万人,占总人口数的40.42%^[1]。尽管农村

人口占全国总人口的比例近年来有所下降,但农村水环境污染的问题却日渐严重。我国目前有260多万个自然村和近60万个行政村,每年可产生90多亿m³污水,污水处理率仅有22%左右^[2],相当一部分农村污水直接或不达标排放造成农村水环境严重恶化。随着农民生活水平的提高,农

[收稿日期] 2020-02-15

[作者简介] 孔进(1963—),男,副教授,研究方向为黑臭水体治理与工程经济。电话:18865901815;E-mail:kongjin@sdjzu.edu.cn。

村普遍存在污水排放量递增与污水处理设施建设相对滞后的矛盾。由于农村经济水平较低,住户比较分散,因此,农村污水的处理不适合采用相对高度集中与高能耗的处理方式。要想解决农村的水环境污染问题,就必须从农村污水治理技术的研究入手。

1 农村污水处理模式

1.1 污水排放规律与污染物特征

根据对山东南部乡村的调研,绝大多数自然村生活污水总量小于 100 m³/d,污水主要来自于厨卫和洗浴,为间歇性排放,每日排放时段一般集中在三餐前后,其他时段排水量较小或基本不排水。农村污水成分简单,主要为有机物、N、P、病原菌、悬浮物(SS)等,基本不存在有毒物质。不同家庭的污水在相同时段亦表现出巨大的差异性,污染浓度的高低与各家庭的生活习惯、卫生习惯和污水收集系统是否完备等因素密切相关。山东南部某村相邻 10 户家庭夏季污水的主要污染物浓度如表 1 所示,采用

混合排水系统的家庭化粪池出水污染物浓度较低,采用源分离排水系统的家庭化粪池出水污染物浓度较高。大部分家庭排出的污水和城市生活污水相比,总氮(TN)浓度相对较高,而碳氮比(C/N)相对较低。

表 1 山东南部乡村家庭综合污水主要污染物浓度
Tab. 1 Concentrations of Major Pollutants in Rural Household Sewage in Southern Shandong

COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	TN /(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N /(mg·L ⁻¹)	TP /(mg·L ⁻¹)
216~1 016	57~220	50~201	5.7~20.8

农村居民相对分散,水质波动较大,污水不便于集中收集,因此,污水处理设施水量规模小,水量变化系数高于城市污水。

1.2 污水分散处理与集中处理的选择

基于农村污水水质和水量特点以及污水收集的难易程度,污水处理模式可分为集中处理与分散处理两大类,两者的差异如表 2 所示。

表 2 农村污水集中处理与分散处理的差异对比
Tab. 2 Contrast of Centralized and Decentralized Treatment for Rural Sewage

处理模式	水质水量 调节能力	处理难易程度	单位运行成本	配套管网投资	处理设施 单位水量投资	运行管理
集中处理	较小	较低	较低	较大	较小	较简单
分散处理	很大	较高	较高	较小	较大	较复杂

仅从处理工艺考虑,集中处理有利于污水水量和水质的均化,污水处理效率高,易于管理,在城市污水处理中多被采用。但农村住户分布较为分散,污水集中收集难度较大,污水处理可能更适合采用较为分散的处理方式。在美国,采用分散式污水处理的住宅比例在 20%以上^[3]。

根据村落规模的大小、住户的集中程度,农村分散污水的处理又可以分别采用大规模分散处理方式(以村庄或片区为单位)和小规模分散处理方式(独立住户或组团住户)。鉴于污水集中处理的优势,应尽量将污水集中,例如,以多户邻近家庭作为一个组团,将污水收集到一起处理,这样既可均化水量和水质,又能降低污水处理设施的总投资和运行维护成本。

2 农村排水系统

排水系统可分为混合排水系统和源分离排水系统。混合排水系统是将生活中产生的所有污水混合

收集和处理的系统,而源分离排水系统则是将粪便和尿液分别单独排放并进行处理的系统。一般意义上的生活污水为人类所有生活起居活动产生的污水,包括灰水、黄水和褐水等。灰水是指来自盥洗间、淋浴、厨房的废水以及洗衣废水;黄水是指尿液或包括尿液在内的冲洗水;褐水是指粪便或包括粪便在内的冲洗水。黄水和褐水的混合污水,即厕所排放的污水,也被称为黑水。

2.1 农村厕所形式与特点

农村厕所长期以来以旱厕为主要形式,近年来有向水冲厕逐步过渡的趋势。农村原始的旱厕一般是将粪便和尿液混合排放,不与厨卫排水合流,是一种不完全源分离卫生系统。水冲厕卫生系统则需要大量清水对粪便和尿液进行冲刷,产生的黑水常常与其他生活污水合流排放,这种排水方式在城市排水系统中被广泛采用。

目前,很多农村已将旱厕改为水冲厕,这种改变

有助于提升农民生活质量,但同时增加了能源和资源的浪费。尿液与粪便量约占到生活污水总量的1.4%~1.8%^[4],这些排泄物在水冲厕中被大量稀释,使得污水排放量大幅增加,大大地增加了处理成本。实际调研发现,水冲厕方式在管网建设不配套、污水处理设施跟不上的农村不发达地区,对环境的污染比旱厕更大。

作为一种不完全源分离的排水系统,农村原始旱厕的排泄物通常被住户长期储存熟化后用于农业生产。这种旱厕,尿液和固体排泄物在厕所下方的化粪池混合储存,其中少量尿液会蒸发掉,大部分尿液可撇起用于肥田,另外少量尿液和粪便一起经自然发酵后用于肥田。由于化粪池往往露天,卫生条件较差,而完全源分离排水系统作为一种新兴技术,需要对室内便器进行改造,使干湿排泄物从源头得以分离,尿液与固体排泄物分别密封储存,而后分别处置。从整体来看,这种方式更为环保卫生,且对资源回收更为彻底。源分离厕所的总投资会随着技术进步逐年降低,经济效益从长远来看将有大幅度提升,在经济发达的农村可以酌情采用^[5]。

2.2 源分离排水系统与资源回收

人粪尿是良好的农家肥,在几千年的农耕文明中起到了举足轻重的作用。然而,水冲厕使得粪便中的N、P、K等营养物质流失,从可持续发展的角度来说并不可取。各类生活污水中营养物质的含量如表3所示,其中黄水和褐水中N、P、K的浓度远远超过灰水中的含量。Xu等^[6]指出,市政污水中10%的尿液贡献了80%的N和42%的P,但对COD_{Cr}的贡献率仅为8%。Ishii等^[7]的研究也证实,通常市政污水中流量占比不到1%的尿液贡献了80%的N和超过50%的P。如果将所有厕所废物回用到农业,则有75%~85%的N、P、K可被作为资源而不是

环境的潜在污染物^[8]。通过技术手段回收这些营养物质,回用于农业生产,将是农村污水处理发展的方向。

源分离排水系统不但能够减少冲洗水的用量,达到节水的目的^[7],还可以减少污水排放量,提高污水处理能力,产出的有机肥可以提高粮食安全^[12]。日本、德国、美国、瑞典等国家源分离排水系统很早就有工程应用,我国近年来也在不断尝试。德国采用源分离系统的示范工程有吕贝克市(Luebeck)某住宅区和弗赖堡市(Freiburg)某住宅区等^[11]。吕贝克市的住宅区源分离生态排水系统利用真空厕所,分别收集黑水和灰水,然后分类处理,降低了污水处理成本,最终可以回收生活污水中60%的N、46%的P和43%的K^[13]。比尔与梅琳达·盖茨基金会(Bill & Melinda Gates Foundation)投资数亿元,致力于开发可有效分离并处理尿液与粪便的蓝色分流厕所(blue diversion toilet),并于2018年在北京“新世代厕所”博览会上进行了展示。Larsen等^[14]在该基金会的资助下于肯尼亚开展了应用研究,证实将这种基于冲洗水循环回用和肥料回收的卫生系统用于解决城市贫民窟的卫生危机是可行的。北京奥林匹克公园建立了源分离的分质排放、处理和循环利用系统,对收集到的黄水进行贮存、腐熟和肥化处理,最终得到了富有营养、易于分解的有机氮肥^[15]。另外,鄂尔多斯市与瑞典合作的生态镇项目也进行了源分离生态排水系统的积极尝试。

Malila等^[16]指出,在农村应用源分离排水系统,可以比现有污水处理系统多回收4倍的P和30倍以上的N,将对水体富营养化的影响减少到现有污水处理系统的1/5。李建军^[17]认为,卫生问题仍然是当前农村污水处理的核心问题,源分离卫生厕所既卫生又生态,建议对农村原生态循环习俗予以保留。源分离排水系统在减少污水排放量、降低污水处理投资和运行成本的同时,通过对粪便和尿液的无害化处理,可实现N、P、K等资源的循环利用,符合农村可持续发展的方向。

3 农村污水处理工艺

目前,我国农村混排污水处理技术主要有化粪池、生物膜法、活性污泥法、人工湿地、土地渗滤、稳定塘等多种形式,究竟哪种方式更适合农村,需要根据实际情况做出判断。由于农村人口居住分散,收

表3 各类生活污水中营养物质估值^[4,9-11]
Tab. 3 Estimated Values of Nutrients in Various Domestic Sewage^[4,9-11]

指标	褐水 (不计冲洗水)	黄水 (不计冲洗水)	灰水
人均流量/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.14	0.95~1.40	70~110
TN/(kg·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	1.5~2.0	7~11	1.0~1.4
TP/(kg·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.3~0.7	0.6~1.0	0.3~0.5
K/(kg·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	2.2~2.6	0.8~1.0	0.5~1.0

集在一起的污水量较少,对处理工艺的要求反而更高。从资源化利用的角度考虑,若将处理水回用于农业生产,则对污水处理工艺出水中如有机营养以及 N、P、K 等指标的要求可适当降低。

3.1 针对源分离排水系统的分质处理工艺

对源分离的排水系统排放的污染物进行分质处理,在降低处理费用的同时,还能得到优质肥料,一举两得。

(1) 黄水的处置

尿液是一种环境友好的肥料,实现黄水的分离式收集和处理,能大幅降低生活污水中的 N、P 负荷^[12]。将尿液腐熟后作为农家肥使用,这在农村是较为便捷的处理方式。尿液腐熟,即尿液在储存过程中发生的一系列物理、化学和生化反应或变化,其中的尿素转化为易于被植物吸收的 $\text{NH}_3\text{-N}$ ^[18]。尿液腐熟 180 d 即可有效杀灭其中的病原菌,满足农用液体肥料的安全标准^[18]。

尿液中的营养元素也可以通过一定的工艺进行回收。将黄水贮存至少 6 个月后进行浓缩或干化,得到的氮素可用于肥田。Ishii 等^[7]研究发现,向尿液中大量添加 MgO 和 Na_3PO_4 ,促使鸟粪石沉淀,可得到较高的 N 回收率。此类方法应用于农村黄水处理的经济性还有待于进一步实践验证。

(2) 褐水的处置

日常生活中每人每天产生的粪便干重约为 $47.9\sim 48.4\text{ g}/(\text{人}\cdot\text{d})$ ^[10]。源分离的人类固体废物(粪便)在农村通常单独或与有机垃圾共同堆肥处理,既能稳定其中的有机物,又能杀死其中的病原菌。堆肥富含有机质,含 N 量高,营养全面,既有肥效,还可改善土壤结构,促进土壤中有益微生物的生长^[19]。

高温堆肥是肯尼亚内罗毕非正规社区实施的一种生态方法,能够更有效地保留粪便中的 N 和 P,其产物中的植物有效氮约为 214.5 mg N/kg ,比 $300\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 热解产物中的植物有效氮高 $16\sim 858$ 倍^[10]。高温堆肥需要对物料加热,能耗高,不适合在农村大规模推广。白帆等^[20]模拟自然状态下生态厕所的好氧堆肥过程,在粪便中加入锯末,保持温度在 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 左右 2 周时间,无需加热,对粪便中有机物的去除率仍可达到 63% 以上,总固体量减少量在 56% 以上,试验结果表明,中温好氧堆肥能够矿化稳定粪

便中的有机物,实现免水冲厕所粪便的资源回收,在农村具有较好的应用前景。一些农村的实际做法是将粪便、有机垃圾与草木灰等按一定比例混合在一起进行封存,经过一段时间后进行翻堆,继续封存至堆肥完成。堆肥物料中的初始 C/N 控制在 $25:1\sim 30:1$,夏季腐熟大约需要 2 个月,冬季腐熟则需要 3~4 个月,堆肥完成后可直接作为农肥使用。

(3) 黑水的处理

唐贤春等^[21]对采用 AAO-MBR 工艺处理黑水的实际工程进行了长期监测,结果显示,经深度处理后的出水满足农作物或林木的浇灌、景观用水补水和道路清洗水要求,产生的污泥与餐余垃圾一起进行厌氧消化后,再经脱水处理可作为农肥使用。这种处理方式投资和运行费用都较高,而且需要专人管理。

农村黑水最简易的处理方式,是先通过三格化粪池进行储存、沉淀和厌氧发酵,上清液经稀释后肥田,再将沉淀污泥与有机垃圾、植物秸秆等混合做堆肥处理。三格化粪池结构简单,在农村应用较为普遍,旱厕黑水进入化粪池后在常温下即可进行厌氧发酵。对某山村黑水化粪池水质进行实测,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 可高达 292 mg/L ^[22],具有很高的农用价值。冯长艳等^[23]对 10 户农家的三格化粪池进行现场试验,以人工湿地组合工艺处理化粪池后的黑水,其中有 8 户出水达到了国家标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中规定的二级标准。

3.2 灰水和混排综合污水的处理

Gross 等^[24]在以色列的农场对灰水回用进行了长期研究,发现灰水不经过处理而直接灌溉作物,会带来比较大的环境与健康风险。灰水和综合污水经过处理后方可用于农业灌溉、园林绿化以及冲洗厕所等。Ghisi 等^[25]研究了两户巴西家庭,对灰水处理后进行回用,分别节省了 25.6% 和 30.4% 的生活用水。

土壤渗滤、人工湿地、稳定塘等占地面积大,但运行费用较低,是较适合农村灰水处理的方式。土壤渗滤和人工湿地进水 SS 浓度不能太高,要求有一定的预处理。张思等^[26]以农村生活污水为研究对象,以粉煤灰为填料配合土壤构建的土壤渗滤系统,对 COD_{Cr} 的去除率达到了 85.8%,对 TN 和 TP 平均

去除率分别为 78.4% 和 98.1%。Hong 等^[27] 开发了一种改进的多土壤分层 (MSL) 系统,专门用于处理农村地区低 C/N 的生活污水, COD_{Cr}、TN、TP 去除率分别达到了 98.29%、69.86%、100%。Elfanssi 等^[28] 利用人工湿地处理摩洛哥农村污水, TSS、BOD、COD_{Cr}、TN 和 TP 去除率分别达到了 95%、93%、91%、67% 和 62%, 而且该系统显示出非常强的杀菌能力。Comino 等^[29] 的试验也验证了湿地植物有助于人工湿地净化不同有机负荷和水力负荷的灰水。山东枣庄农村多利用村边坑塘兴建稳定塘, 对灰水和雨水的混合污水进行处理, 塘内种植芦苇、荷花、菖蒲、睡莲等植物, 既美化了环境, 对水环境污染也起到了一定的缓解作用。

生物转盘运行费用较低, 也比较适合用来处理农村污水。昆山农村采用以生物转盘为主体的 SW 一体化污水处理装置处理生活污水, 出水再经人工湿地强化处理, 水质达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中的一级 A 排放标准^[30]。Amr 等^[31] 的研究显示, 生物转盘系统对灰水中 BOD₅ 处理效率约为 93.0%~96.0%, 对 TSS 去除效率约为 84.0%~95.0%。

日本农村对于不能纳入集中排水工程的分散污水, 普遍采用安装方便、操作灵活的净化槽处理技术^[32]。日本的净化槽技术已从最初只处理粪便的单独处理净化槽, 发展到了处理综合生活污水的合并处理净化槽以及出水可再生利用的深度处理净化槽。相比土地处理法, 净化槽技术处理效果好, 但投资和运行成本相对较高。日本政府在通过立法约束农村居民排污行为的同时, 采用净化槽补贴制度推动净化槽技术在农村的推广^[33]。净化槽技术实际上是将常规污水处理工艺中的预处理、生化处理、膜分离、消毒和污泥处理等多个单元集成于一体化设备中, 利用物理、生物和化学作用等净化污水。生化部分一般由两步厌氧单元和一步好氧单元组成, 主要通过厌氧微生物与好氧微生物的作用降解污水中的有机污染物以及脱氮除磷。干钢等^[34] 采用膜式净化槽对安吉县农村生活污水进行深度处理, 出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中的一级 A 排放标准, 对 SS、BOD₅、COD_{Cr} 的平均去除率分别达到了 93.95%、84.46%、83.64%, 对 NH₃-N 和 TP 的去除率分别达到了 97.94% 和 94.13%。目前净化槽技术在我国多地已

得到借鉴与应用, 但受管理水平和经济水平的局限, 普遍存在管护不力的现实问题^[35]。

4 结论

农村居住区布局分散, 人口密度低, 经济条件、自然条件、环境容量等差异较大, 应因地制宜地选择污水处理技术解决农村生活污水的问题。

(1) 对未改造为水冲厕的排水系统, 宜保留原有旱厕或改造为完全源分离排水系统, 由住户对各自产生的污水进行分类收集, 并结合实际情况进行处置和资源化利用, 在农业生产中最大程度利用人粪尿中的 N、P、K, 减少资源和能源浪费。黄水宜采用腐熟的方式进行资源化利用; 褐水宜采用中温堆肥的方式进行资源化利用。

(2) 对水冲厕的排水系统, 针对农村居住分散、污水难以集中的特点, 建议采用组团式多户联用的污水收集系统和污水处理模式。低耗是农村污水处理技术发展的主要方向, 污水处理应尽量采用简单易行、维护方便的工艺。

(3) 黑水宜采用三格化粪池加各种生化处理或多种生化处理的集成技术, 灰水和混排综合污水可采用人工湿地、土地渗滤、净化槽、生物转盘等进一步净化。稳定塘对雨、污混流污水处理效果虽然不够理想, 但可以作为经济欠发达地区农村污水处理的一种权宜之计。

参考文献

- [1] 国家统计局. 2018 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2019-02-28) [2020-01-15]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201902/t20190228_1651265.html.
- [2] 张丽荣. 农村污水处理技术 [J]. 化工设计通讯, 2019, 45(5): 123-124.
- [3] 田泽源, 吴德礼, 张亚雷. 美国分散型生活污水治理的经验与启示 [J]. 给水排水, 2017, 53(5): 52-57.
- [4] 刘玲花, 张盼伟, 王启文. 基于源分离的农村分散式生活污水处理技术 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 196-202.
- [5] 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.
- [6] XU K N, QIAN Y, WANG C W, et al. Evaluation of urine source-separation: Effects on existed wastewater treatment and values of nutrients recycle [C]. 北京: 环境模拟与污染控制国际学术研讨会暨第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文集, 2011.
- [7] ISHII S K L, BOYER T H. Life cycle comparison of centralized wastewater treatment and urine source separation with struvite

- precipitation; Focus on urine nutrient management[J]. *Water Research*, 2015(12): 88-103.
- [8] VINNERÅS B, JÖNSSON H. The performance and potential of faecal separation and urine diversion to recycle plant nutrients in household wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2002(9): 275-282.
- [9] UDERT K M, LARSEN T A, GUJER W. Fate of major compounds in source-separated urine[J]. *Water Science Technology*, 2006. DOI: org/10.2166/wst.2006.921.
- [10] LEILAH K, AKIO E, HAROLD V E, et al. Biological and thermochemical conversion of human solid waste to soil amendments[J]. *Waste Management*, 2019(7): 366-378.
- [11] 李子富. 城镇污水处理源头控制技术及进展[J]. *建设科技*, 2013(2): 32-35.
- [12] MCCONVILLE J R, KVARNSTRÖM E, JÖNSSON H, et al. Source separation: Challenges & opportunities for transition in the swedish wastewater sector[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017(5): 144-156.
- [13] 徐康宁, 张驰, 汪诚文, 等. 黄水源分离排水技术对我国城镇生活污水氮磷减排的作用[C]. 南宁: 中国环境科学学会学术年会论文集, 2012.
- [14] LARSEN T A, GEBAUER H, GRUNDL H, et al. Blue Diversion: a new approach to sanitation in informal settlements[J]. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 2015, 5(1): 64-71.
- [15] 李禾. 源分离技术: 给水体减减肥[J]. *今日科苑*, 2009(7): 20-22.
- [16] MALILA R, LEHTORANTA S, VISKARI E L. The role of source separation in nutrient recovery e Comparison of alternative wastewater treatment systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(14): 350-358.
- [17] 李建军. 农村原生态循环习俗应予以保留[J]. *水工业市场*, 2011(5): 10-12.
- [18] 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.
- [19] 耿开友. 农村实用堆肥技术[J]. *云南农业科技*, 2004(4): 46-48.
- [20] 白帆, 王晓昌. 粪便中温好氧堆肥过程有机物的降解研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(9): 15-18, 53.
- [21] 唐贤春, 贺艺, 宋鹏, 等. 半集中式分质供排水和资源化系统的集成应用[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(7): 1612-1622.
- [22] 付婉霞, 秦晓晶, 汪燕. 改进型山区村庄三格化粪池污水处理效果的试验研究[J]. *给水排水*, 2009, 45(s2): 283-285.
- [23] 冯长艳, 代兴碧, 牟李红, 等. 重庆市农村三格化粪池后粪水处理方法的现场研究[J]. *卫生研究*, 2009, 38(2): 221-223.
- [24] GROSS A, AZULAI N, RONEN Z, et al. Environmental impact and health risks associated with greywater irrigation: a case study[J]. *Water Science Technology*, 2005(8): 161-169.
- [25] GHISI E, FERREIRA D F. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(4): 2512-2522.
- [26] 张思, 宁国辉, 杨铮铮, 等. 复合填料土壤渗滤系统处理农村生活污水的效果[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(11): 4625-4630.
- [27] HONG Y Y, HUANG G H, AN C J, et al. Enhanced nitrogen removal in the treatment of rural domestic sewage using vertical-flow multi-soil-layering systems: Experimental and modeling insights[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019(12): 273-284.
- [28] ELFANSSI S, OUAZZANI N, LATRACH L, et al. Phytoremediation of domestic wastewater using a hybrid constructed wetland in mountainous rural area[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(1): 75-87.
- [29] COMINO E, RIGGIO V, ROSSO M. Grey water treated by an hybrid constructed wetland pilot plant under several stress conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2013(4): 120-125.
- [30] 顾秀根. 污水生物处理新工艺新技术—生物转盘及其应用实例[J]. *四川建材*, 2015, 41(1): 91-93.
- [31] AMR M, KADER A. Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system[J]. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2013, 25(2): 89-95.
- [32] 刘兰岚, 郝晓雯. 日本的分散式污水处理设施[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(27): 16714-16715, 16749.
- [33] 周隆斌, 巩前文, 穆向丽. 日本农村生活污水治理经验及其对中国的启示[J]. *农村工作通讯*, 2019(9): 61-63, 2.
- [34] 干钢, 唐毅, 郝晓伟, 等. 日本净化槽技术在农村生活污水处理中的应用[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(5): 1791-1796.
- [35] 贾小梅, 陈春兵, 董旭辉, 等. 净化槽技术在我国应用现状和问题及对策研究——基于江苏扬州市广陵区和常熟市净化槽建设运营现状的调查[J]. *环境与可持续发展*, 2018, 43(6): 81-83.