



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20170128

农村生活污水分散式处理的技术开发与应用

王 昶, 王洪亭, 曾 明, 何迎春
(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘 要: 农村生活污水引起的污染问题是我国当前亟待解决的环境问题, 而农村生活污水的特点决定了治理思路的特殊性. 本文首先总结了我国农村生活污水的特点和污染现状, 对比了国内外常用的几个主要技术的优缺点, 结合本团队 13 年的理论探索和工程经验, 首次提出了以净化槽为核心的农村生活污水归一模块化处理模式, 将复杂的农村生活污水处理系统简单化, 出水尽可能采用自流式, 形成由水解槽、管网、新型净化槽和气泵构成的模块化系统, 适合于广大农村的不同区域. 目前研究团队在天津地区已经建立了众多成功的农村生活污水处理的示范工程, 所有工程都能做到无人值守、稳定可靠、出水水质均达到了 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准. 这套农村生活污水治理的模式必将为我国农村环境保护事业提供坚实的技术保障.

关键词: 农村生活污水; 净化槽; 示范工程; 生物膜; 脱氮除磷

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2017)05-0001-09

Development and Application of Decentralized Treatment of Domestic Sewage in Rural Areas

WANG Chang, WANG Hongting, ZENG Ming, HE Yingchun

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The pollution of domestic sewage in rural areas is an urgent environmental problem in China, and its characteristics require a new treating method different from those for urban domestic sewage. Firstly, the characteristics and pollution situation of domestic sewage in rural areas were summarized. Then the advantages and shortcomings of several main technologies in treating sewage were analyzed. Based on theoretical exploration and engineering experience for 13 years, our team proposed a normalized treating mode for domestic sewage in rural areas for the first time, which relies on the purifying tank. This simplified sewage treatment system was composed of hydrolytic tanks, pipelines, novel purifying tanks and air pumps. Wastewater flows by gravity. Up till now, several successful demonstrational applications of domestic sewage treatment in rural areas of Tianjin have been set up, and are reliably working without man's care. Importantly, the effluent quality has reached the first level B standards of "discharge standards for urban sewage treatment plants" (GB 18918-2002) in our country. This model of domestic sewage treatment in rural areas is supposed to provide a solid technical support for rural environmental protection in China.

Key words: rural domestic sewage; purifying tank; demonstration project; biofilm; nitrogen and phosphorus removal

到目前为止, 我国农村地区的人口已经达到 6.6 亿^[1], 生活污水日排放量达 3 000 万 t 以上, 农村生活污水处理率仅为 7%^[2]. 这些生活污水中含有的有机物、氮和磷等污染物, 严重威胁到农村的生态环境安

全, 可是由于投入资金不足和人们环境保护意识的淡薄, 据 2005 年建设部《村庄人均环境现状与问题》调查报告显示, 96% 的村庄都没有排水渠道和污水处理系统^[3]. 因此农村生活污水的治理已经成为国家发

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-06-13

基金项目: 天津市农委重大专项合作项目(201404140); 天津市科委重大专项(14ZCDGNC00097)

作者简介: 王 昶(1958—), 男, 江苏人, 教授, wangc88@163.com

展战略,“十三五”规划明确提出了“全面推进农村人居环境整治,加大农村污水治理”的建设目标。

目前,全国各地正在大力兴建农村生活污水处理设施,取得了一些效果,但有些工程不能正常运转,其中的原因亟待分析,需要总结出一套真正适合中国农村生活污水处理的模式。本研究团队在农村生活污水处理领域通过 13 年的理论探索和工程实践,已经建立并且长期运行了一些农村生活污水处理示范工程,在国内率先提出了农村生活污水的归一模块化处理模式。本文首先分析了农村生活污水的特点和污染现状,然后对比了不同处理技术的优劣,最后详细阐述了农村生活污水的归一模块化处理模式的理论内涵和工程应用案例。

1 农村生活污水的特点与污染现状

1.1 农村生活污水特点

家庭生活污水包括冲厕水、厨房水、洗澡水以及洗涤水等,日本各类家庭生活污水的平均水量和生化需氧量(BOD)见表 1^[4]。

表 1 日本家庭生活污水的平均水量和水质

Tab. 1 Average quantity and quality of domestic sewage in Japan

排放源	污水量/ (L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	BOD 负荷量/ (g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	BOD 平均值/ (mg·L ⁻¹)	
厕所	50	13	260	
厨房	30	18	600	
洗涤	40			
洗澡间	50		75	180
洗脸	20	9		
扫除	10			
合计	200	40	200	

家庭生活污水的特点包括排放的不连续性,具有间隙脉冲特征,早、中、晚用水集中,而且冲厕水和厨房水都含有难降解的固体颗粒物。这些是城市生活污水和农村生活污水的共同特征,但是不同于前者,农村生活污水有其自身的特点和处理的难点,出水要达到国家一级排放标准的难度较高。归纳起来主要有以下 3 个主要难点:

(1) 农村人口密度低,农户分散,局部地区污水总量小,缺乏污水收集和输送设施,生活污水难以集中收集,特别是小城镇公共下水道设施的建设普遍存在资金不足的现状。尽管在城市生活污水处理中氧化沟、A/O、A²/O 和 SBR 等工艺效果显著,但是这些集中处理方法需要昂贵的污水收集管网建设费用,不

仅投资大,而且运行管理复杂,维护费用较高,在经济水平低、技术落后的农村地区难以推广实施。因而,集中处理模式在农村地区会因财政上的原因难以实行,分散处理就显得十分重要。

(2) 随着农村抽水马桶等用水器具日渐普及,各种洗涤剂的使用量也有所增加,污水中氮、磷浓度高并含有大量的营养盐、细菌、病毒,给农村生活污水的处理带来了一定难度。

(3) 农村生活污水处理工艺很难保证持续、长久运行。生活污水的处理工艺很多,每个工艺都各有优缺点,选择合适工艺要综合考虑多方面的因素:①经济因素,应当结合当地经济发展水平,考虑当地农民的经济状况及承受能力,选择具体工艺时要降低投资成本,少占用土地,使运行维护费用在农民的可承受范围内,以保证资金及时投入,设备正常运行。②工艺简单,运行简便,便于农民的日常维护。③处理效果,应在低耗的同时要保证高效的处理效果。

因此,对农村生活污水既要经济高效、直接原位处理,又要严格达标,那么处理污水用的生物反应器需要比城市污水处理系统具有更高的核心技术。

1.2 农村生活污水污染现状

由于我国农村发展的不平衡性,农村居民的用水量和污染物的浓度差异很大,往往水量多的地区污水中污染物浓度相对较低,而水量少的地区污水中污染物浓度较高。侯京卫等^[5]总结了我国 11 个省市的农村生活污水水质水量数据,发现农村生活污水排放量在 14.5 ~ 116 L/(人·d) 范围内波动,平均值为 60.1 L/(人·d);而化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)分别在 62.1 ~ 1 200.0 mg/L、11.0 ~ 151.2 mg/L 和 0.3 ~ 13.8 mg/L 之间变化,平均值分别为 386.4 mg/L、50.5 mg/L 和 3.7 mg/L。可见我国农村地区的水量和水质在不同的地区可能相差甚大,因此研究人员在设计工艺时应该考虑污染物的负荷,而不仅仅是水量,简单来讲应该以农户的数量作为计算的依据。

我国目前并没有农村生活污水排放的国家标准,往往是根据市政生活污水处理的 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级 A 或者一级 B 来控制污染物的排放^[6]。但是事实上,这种将市政生活污水的评判标准直接复制到农村生活污水治理中的做法是否合理还有待商榷。首先,农村地区的土地资源丰富,生活污水中剩余的氮和磷都可以完全被植被吸收,在避免污染自然水体的同时还能产

生可观的经济效益;其次,与农村生活污水排放到自然界中的氮和磷相比,农业活动如施用化肥对水体氮和磷的贡献要大的多;最后,如果要使出水水质从一级 B 提升到一级 A,需要将 TP 从 1 mg/L 减少到 0.5 mg/L,将 TN 从 20 mg/L 减少到 15 mg/L,这个过程需要消耗大量的能量,产生的运行费用是农民无法承受的,并且增加了处理系统的复杂程度和不稳定性.因此,笔者认为对于农村生活污水,国家应该尽快出台相关的污水排放标准,如果仍然参照 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》,那么一级 B 标准就能实现农村生活污水处理的低耗高效.

2 农村生活污水常用的几种处理技术

2.1 稳定塘

稳定塘是利用藻类和细菌的共生关系,增强水体的自净作用来降解水中的污染物,由于它不需要人工曝气,建造和运行费用低廉,而且技术要求不高,不需要专业人员维护,管理方便,特别适合农村地区.但是传统的稳定塘占地面积大,水力停留时间长,处理效果受温度、光照影响大,效率较低,而且容易散发臭气、滋生蚊蝇^[7].

不同于传统稳定塘,现在被人们广泛采用的是美国加州大学伯克利分校的 Oswald 提出的高效藻类塘^[8].相对于传统稳定塘而言,高效藻类塘对土地面积需求更少,更适合对农村或偏远地区的污水进行消毒^[9].黄翔峰等^[10]利用高效藻类塘处理太湖地区的农村生活污水,发现菌藻共生使塘内水体溶解氧浓度较高,COD、氨氮和磷酸盐的去除率可以分别达到 70%、90% 和 50%.高效藻类净化塘中生长的藻类还是一种非常好的生物质燃料, Park 等^[11]在用于污水处理的高效藻类净化塘中回收藻类制备生物燃料.

2.2 人工湿地

人工湿地是人为建造的模拟自然生态系统中物理、化学和生物净化作用的系统,用来去除生活污水中的有机物、氮、磷和重金属等污染物,其中起主要作用的是植物吸收和微生物分解,另外不同的填料能起到过滤、吸附、离子交换等净化效果.利用物理、化学和生物互相之间的协同作用净化污水,该技术的主要优点是工艺简单,基本不需要人工曝气系统,效率高、耗能低、投资少、适用广泛等^[12],植物在吸收氮、磷的同时还能具备生态功能 and 经济效益^[13].例如,付

融冰等^[14]研究了芦苇和菖蒲潜流水平人工湿地的脱氮效果,发现脱氮效率都可以达到 60% 以上,主要的脱氮途径是微生物的硝化和反硝化,植物吸收、存储的氮仅占湿地总氮去除量的 10% 左右,但是植物的存在可以间接影响湿地其他的脱氮途径. Wu 等^[15]发现人工湿地非常适合偏远地区的农村生活污水处理,对污水中 BOD₅、总悬浮固体、氨氮和总磷的去除率分别达到 96.0%、97.0%、88.4% 和 87.8%.徐和胜等^[16]发现芦苇水平潜流人工湿地的除磷效率可以高于 88%,但是大部分的磷是通过填料的吸附和沉淀作用被除去,而植物吸收的磷仅占磷去除总量的 9.1%.

尽管人工湿地有上述的优点,但是也存在一些缺点,如占地面积较大,处理效果受季节影响严重,冬季效果较差.该工艺通常用于组合工艺的后段,保证最终的出水水质达到一级 A 的标准,尤其适合于有地势差或对氮、磷去除要求较高的农村地区.

2.3 土壤渗滤系统

土壤渗滤系统是利用土壤的过滤、吸附和生物降解等功能达到净化水质的目的,污水经过处理后主要补给地下水,维持地区的水量平衡.该生态系统有保护地下水和地表水的重要功能,它的效率主要取决于污染物在土壤中的行为和土壤中水力学条件^[17]. Murakami 等^[18]发现利用该系统可有效去除污水中的有机物、磷元素、病原微生物和重金属.该系统具备设备简单、投资少、管理方便、能耗低等特点,但是如果运行不当,非常容易堵塞土壤,使土壤渗透性下降,形成水流短路^[19],也会造成系统的缺氧.为了解决这个问题,研究人员对该系统做出了许多改进,如日本开发了由土壤混合层和通水层交替分布形成的多级土壤渗滤系统^[20],澳大利亚的专家开发了利用土地过滤、暗管排水相结合的“管排水相结合的污水处理系统”,污水持续灌溉农作物,使氮、磷含量降低,水质达标^[21].

2.4 净化槽

净化槽是一种源于日本的农村生活污水处理的装备,起初只是类似于化粪池的简易装备,专门用于处理厕所的污水,称为单独净化槽.这种简易装置对污染物的降解效果差,无法达到越来越严格的排放标准,仅可作为一种贮水容器使用,并没有净化污水的功能^[22].由表 1 可知在现代化的生活方式中,厕所污水中污染物 BOD 的负荷量只占总 BOD 负荷量的 32.5%,所以 2001 年日本立法取缔了单独净化槽,即化粪池不能作为生活污水的最终处理设施.要求将

家庭不同来源的生活污水一同处理,这就形成了特有的合并式净化槽,也就是目前被广泛采用的净化槽^[23].因其工艺建设及运行所需成本低,维护简单,适用于污水排放分散无序、水质及水量变化较大的农村^[24].由于日本生活污水净化槽开发和推广速度过快,使人们在对净化槽的科学认知上存在一些不足,如采用滤床和活性污泥混合处理,出水用水泵进行回流.这样不仅导致装置复杂,而且处理效果也不高,后期对污泥的处理增加了管理负担,例如日本全国就有8万多公务员负责管理净化槽,每个净化槽的污泥清理费用为4000日元一次.近十几年,不论是日方提供的净化槽,还是各种途径进口的净化槽,在我国几乎很难运行,所以开发适合于我国国情的净化槽极为重要.

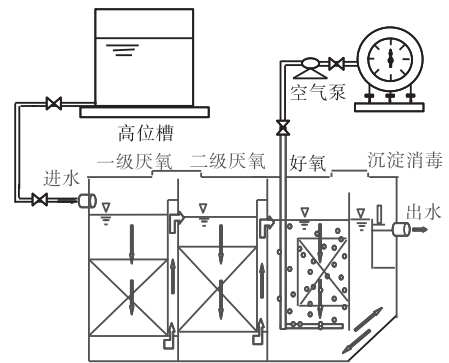
2.4.1 一体化净化槽研究概况

本研究团队从2003年就开始了分散式一体化净化槽处理家庭生活污水的基础研究^[25],由于当时我国政府计划提升农村饮用水质量,提出了2010年在沿海地区农村全面实行自来水化的国策,所以本团队认为有必要寻找一种适合我国农村生活污水处理的系统工程,完善对自来水化后的排水处理,让自来水化工程更加完美.本团队在日本净化槽的启发下,为了实现无人值守和污泥减量的目标,首先从根本上对净化槽进行创新,利用反应工程平推流和全混流的基本原理,对净化槽内部构件进行改造,抑制了高浓度污水进入低浓度区,降低后续的处理负荷,同时利用生物滤床提高微生物浓度,进而提高生物反应器的效率,取得了很好的处理效果^[26-30].研究了净化槽的抗冲击性,分别对进水的污染物浓度和进水流量进行了系统的研究,验证了能达到国家排放标准的净化槽污水处理能力,为实际应用提供了基础数据^[31-32].鉴于曝气区域中合适的溶解氧浓度是决定曝气强弱的关键技术^[33-34],对净化槽的节能效果进行了研究,特别是曝气量对处理效果的影响,得到了既节能减排又能达到出水水质标准的最佳曝气量,为实际应用中气泵的选型提供了基础数据.探讨了生物滤床的必要性和不同的滤床材料的处理效果,强调了生物滤床可以实现污泥减量的重要性,开发了一种高效率的多孔波纹板生物滤床^[35],其效果明显优于其他滤料,并且在实际应用中得到了验证^[30].

2.4.2 一体化净化槽的技术和结构特点

经过多年的基础研究,开发出了具有知识产权的净化槽,如图1所示.图1(a)是净化槽流程简图,可以看出净化槽内部具有几个各自独立的功能区

域.图1(b)是加工好的大型净化槽成品,实现了装备制造的标准化和产业化,大大降低了产品的成本.



(a) 净化槽流程简图



(b) 净化槽成品图

图1 净化槽的流程简图和净化槽成品图

Fig. 1 Flow chart and picture of the large-scale purifying tank

不同于传统的日本净化槽,本研究团队通过优化净化槽的填料和水力学行为,使这种生物膜反应器具备以下3个优点:

(1)平推流厌氧生物反应器和全混流好氧生物反应器一体化的系统设计,使进口处高浓度生活污水在第一段的平推流厌氧生物反应器中连续降解,不形成逆流,从而抑制高浓度污水进入低浓度区,增加抗冲击能力,有利于间隙排放的生活污水的处理.同时在净化槽之前借助水解槽将生活污水中的大颗粒物质分解成为小分子可溶态物质.

(2)生物膜滤床技术,在厌氧区和好氧区各增加一定量的滤床,对滤床种类、构造以及在设备中的安装方式进行优化设计,防止了填料的堵塞,有效发挥滤床固液分离作用、生物膜吸附作用以及生物降解作用,抑制冲刷水中的颗粒物流入低浓度区,进一步提高抗冲击性能,实现高效处理.

(3)空间上的一体化技术,厌氧区、好氧区、沉淀区以及消毒区连为一体,两区共用一壁,污水以自流方式运动,不需要外加动力,节能减排.

整个装置中没有任何的金属构件,防止了内部腐

蚀,增加了设备的寿命周期,而且采取埋地式的安装,冬天也能正常运行.因此完全可以做到无人值守,寿命周期可以达到30年.

2.4.3 单户型一体化净化槽示范效果

净化槽的开发必须要从实验室研究转化为实际的示范工程,本研究团队首先进行了单户型一体化净化槽的示范工程.农村单户型净化槽稳定运行2年后的处理效果照片如图2所示.在实际运行过程中,经历了气温的变化和夏季暴雨排水系统的多次返灌,但是处理效果没有受到影响,证明自主开发的净化槽抗冲击性很强,这主要是生物滤床的作用,完全避免了活性污泥法的缺点.上述单户型净化槽稳定运行7年后的处理效果照片如图3所示.期间从未停止运行,也没有对净化槽进行过人工清理,可以明显看到7年后在第一段的厌氧区驯化出了有效的微生物以及特有的后生动物,将这些浮渣进行了消减,充分体现了该系统的抗冲击能力.

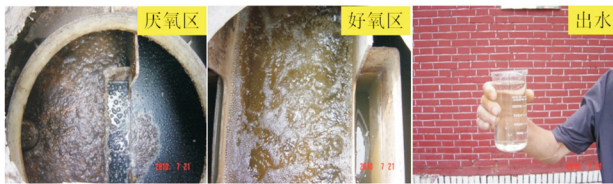


图2 净化槽实际运行2年的处理效果图

Fig. 2 Field-scale purifying tank having been treating real domestic sewage for 2 years



图3 净化槽实际运行7年的处理效果图

Fig. 3 Field-scale purifying tank having been treating real domestic sewage for 7 years

净化槽从自然启动到稳定运行期间的水质变化情况见表2.启此净化槽的启动时间是2008年8月23日,11月7日取水分析,出水水质 BOD_5 相比原水有所降低,但仍然很高,然后立即投菌,11月15日取水检测发现水质极为清澈透明,水质已达到了国家城镇污水排放标准一级B的要求.经过近4个多月的连续分析发现,处理效果和稳定性都很好,7年后的数据分析也证明了本研究团队开发的净化槽完全可以用于单户型农家生活污水的处理,处理每吨水耗电量为 $1.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$.

表2 投菌前后净化槽各段水样中 BOD_5 浓度随时间的变化

Tab. 2 Changes of BOD_5 concentrations with treating time in different zones of the purifying tank before and after bacteria inoculation

取样日期	$BOD_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$				
	原水	一级厌氧出口	二级厌氧出口	好氧区	出水
2008-11-07	275.4	248.2	180.3	66.2	64.3
2008-11-15	263.0	210.1	115.6	32.2	19.3
2008-11-25	268.0	209.3	97.7	23.6	16.5
2009-03-25	259.0	201.4	95.1	26.6	18.5
2015-08-10	264.5	195.7	98.4	30.1	16.3

至今3台单户型净化槽已经连续运行了8年多,期间一直工作良好,真正实现了无人值守.农业部张桃林副部长、日本东京大学代表团和日本日立公司人员参观后都非常认可这项示范工程,同时该工程还获得全国农牧渔业丰收奖一等奖.

3 农村生活污水分散处理的必要性

以上4种常见的农村生活污水处理工艺,它们都有各自的优点和缺点,而这些工艺的组合往往能弥补各自技术的不足,提高处理效果,降低能耗.张增胜等^[36]采用生物净化槽/强化生态浮床组合工艺处理崇明岛的农村生活污水,平均出水COD小于 45 mg/L ,氨氮小于 5 mg/L ,总磷小于 0.75 mg/L ,固体悬浮物(SS)小于 20 mg/L ,已经达到一级B标准.

值得强调的是,无论采用哪种技术,要想以较小的投入实现污水处理系统的长期稳定,分散式的处理方式是首选,并且这一观点已经被国内大多数学者所认同^[7, 37-39].因为分散处理农村生活污水模式适合于居住分散、地势复杂、难以建立下水道管网的广大农村,在这一点上,学术界和各地政府的管理层面已形成共识.2015年10月在江西南昌举办的第五届中国农村和小城镇水环境治理论坛上,本研究团队提出了适合中国国情的农村生活污水分散处理模式,引发了积极讨论.2016年9月在北京举办的第六届中国农村和小城镇水环境治理论坛上,基本都是围绕分散处理农村生活污水的专题发言和讨论,分散式处理农村生活污水模式得到了社会的认可.日本尝试农村生活污水集中式处理的结果是负担过重,处理成本很高,例如日本政府在静冈县芝川町上长贯农村建设集中污水处理设施,该村庄一共只有42户,198名村民,设施设计的处理能力为每天240人排放的家庭生活污水,污水流出农户家庭后通过重力流和提升泵进

入地下排水管道和集水井,最终通过沉淀分离以及接触曝气的方式净化水质. 42 户集中处理投资费用为 5.26 亿日元,每年每户平均费用为 6.45 万日元,折合人民币为 3 870 元. 可见集中式的处理方式因地下管网建设费用过高,污水处理成本也会因水量过小造成吨水处理费用高. 很多集中处理设施都因管网建设问题很难收集到污水,导致示范工程难以运行,因此未来中国农村生活污水处理模式基本为分散处理模式.

4 农村生活污水归一模块化处理模式

4.1 多户联用归一模块处理模式

本研究团队针对农村农户居住分散,地势复杂的特点,再结合我国农村管理模式,认为多户联用处理模式更适合我国农村生活污水的处理^[40],虽然单户型净化槽的技术和装备成熟,处理效果也较好,但在节能减排方面还有待完善,特别是设备的投资较大,尽管单户净化槽减少了部分管网的建设费用,但一户一台净化槽的建设成本还是不能适应国情,需要进一步的研究开发,实行多户联用. 经过近 4 年的研究,本团队开发出了一种新型净化槽,通过增加净化槽中的曝气区域和调控气泵功率,优化组合形成了一种多个农户联用处理的模式. 具体措施是在原来单户净化槽的基础上,增加了气提装置,减少启动时间,让微生物在整个净化槽的内部进行循环;净化槽中各区域都加装曝气装置,充分利用气泵与好氧区域的优化组合,增加处理能力,实现多户联用处理;对生物滤床材料进行表面拉毛处理,增加生物着床的几率,快速挂膜.

除了净化槽的改进外,还开发出与此相匹配的水解槽,充分利用低氧下的微生物和后生动物,使任何家庭生活污水进入水解槽后,都将以可溶性的污水流出,大大降低了后续的处理负荷和后续管网的建设费用,这一过程被称为归一模块化处理模式. 图 4 是多户联用净化槽处理农村生活污水的流程图,家庭生活污水进入各自的水解槽,酸化降解后经过管道流入新型净化槽,在厌氧或好氧的条件下进行生化处理. 这种处理模式将复杂的农村生活污水处理系统简单化,尽可能采用自流式,形成由水解槽、管网、新型净化槽和气泵构建成的模块化系统,适合于广大农村的不同区域.

一级厌氧加二级好氧小型净化槽在不同进水流

量下处理生活污水的能力^[32] 如图 5 所示. 实验装置只有实际大型净化槽装置体积的 1/133. 考虑到净化槽前端有水解槽的作用,原水污水 BOD₅ 的浓度较低,结果显示即使处理相当于七户农家产生的生活污水(进水流量为 70 L/d,出水 BOD₅ 仍然低于一级标准,因此这种净化槽完全可以满足处理五户农家污水的需要,该研究为新型净化槽的实际应用提供了重要的基础数据.

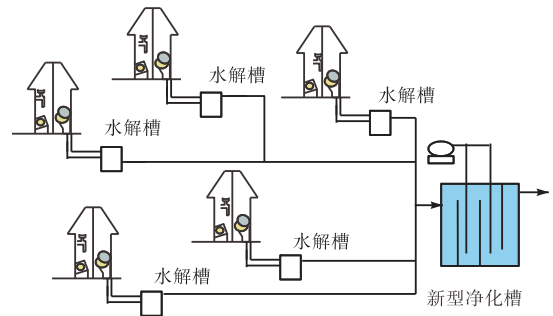


图 4 多户联用净化槽处理农村生活污水流程图

Fig. 4 Flow chart of domestic sewage treatment of five households with hydrolytic tanks and purifying tanks

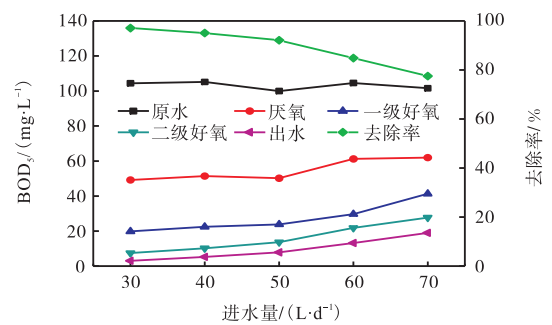


图 5 进水量对新型净化槽处理效果的影响

Fig. 5 Effect of flow rate on the sewage treatment efficiency of the novel purifying tank

4.2 应用案例

针对农村各种不同的生活方式,研究团队以归一模块化模式为指导,在天津市科委和农委的项目资金的支持下,利用水解槽与净化槽的不同组合来处理单户、多户、别墅、楼宇甚至小型企业产生的生活污水,建立并且成功运行了许多示范工程.

4.2.1 天津市西青区辛口镇第六埠村

2006 年在天津市农委的支持下,启动了净化槽示范工程项目,在西青区辛口镇第六埠村选择了三家农户分别安装了单户型的净化槽装置. 在前期小型化净化槽基础研究的支撑下,大型净化槽的运行稳定,抗冲击性强,不受环境温度的影响,实现了无人

值守. 之后, 2009 年开展了多户联用的示范工程, 为了验证不同生活方式农户的联用效果, 专门选择了两套两户联用, 一套十五户联用和一套楼宇十户联用的归一模块化处理系统进行示范工程.

图 6 是十五户联用系统的示范工程现场和处理效果图. 随着户数的增加, 根据图 5 的实验数据判断生活污水的污染物负荷已超过一台新型净化槽的处理能力, 所以采用两台新型净化槽串联方式处理污水, 串联处理 2015 年 8 月完成, 随即启动, 经过一年多的稳定运行, 出水水质仍然保持清澈透明, 即使 2016 年暴雨次数较多导致下水管道雨污水返灌, 也未受到影响. 说明该系统的抗冲击性能力很强, 能够快速恢复处理效果, 保持稳定运行, 出水水质 BOD_5 稳定在 20 mg/L 以下.



图 6 十五户联用示范工程的现场和处理效果

Fig. 6 Domestic sewage treatment efficiency of 15 households

楼宇十户联用示范工程的现场和处理效果如图 7 所示. 2015 年 9 月稳定运行至今, 解决了新农村建设中楼宇生活污水处理的难题, 实现了污水的原位处理, 多台净化槽串联保证水质能够达标排放.



图 7 楼宇十户联用示范工程的现场和处理效果

Fig. 7 Domestic sewage treatment efficiency of 10 households in apartments

总之, 实践证明以归一模块化处理模式为指导的净化槽多户联用技术不仅可以减少净化槽的设备投资, 而且还可以减少下水管网的建设费用. 因为农村不能像城市生活污水处理那样修建价格昂贵的地下管网, 所以农村生活污水处理的关键就是污水的收集, 本研究团队开发的归一模块化处理系统就能很好地解决这一难题, 为农村生活污水处理实现了节能减

排, 将会成为我国特有的一种模式. 多户联用模式能够大大降低处理能耗以及投资成本. 联用的户数越多, 能耗和投资费用就越低, 相对于单户型的净化槽而言, 五户联用时, 吨水能耗可以降低 33%, 投资降低 65%^[40].

4.2.2 天津市静海区惠丰西村

在天津市科委的支持下, 以扶贫的形式对天津市静海区惠丰西村进行整体的农户家庭厨卫改造并处理产生的生活污水. 该村有农户 138 户, 居民 483 人. 针对家庭生活污水, 采用单户和多户联用的分散式处理方式, 由于该村庄的房屋排列整齐规范, 归一模块化处理系统以五户家庭为一个处理单元, 共用一个新型净化槽, 每户户外出水口处安装一台水解槽, 共建造了七套这样的系统, 同时也对该村 3 个地理位置比较分散的农户采用单户型净化槽, 共建有三套. 示范工程分两期进行, 第一期建设时间是 2014 年 10 月, 第二期建设时间为 2015 年 4 月, 至今所有系统都在稳定运行, 吨水处理耗电 $0.6 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 虽然在此期间也有停电的状况, 但是两年间从未出现过故障. 五户联用示范工程的现场和处理效果图如图 8 所示. 该示范工程体现了归一模块化的处理思路, 工程在没有改变村庄的原始面貌的情况下, 开展了农村生活污水集中处理的探索.



图 8 五户联用示范工程的现场和处理效果

Fig. 8 Domestic sewage treatment efficiency of 5 households

4.2.3 天津市蓟州区桃花寺村

天津市蓟州区桃花寺村有农户 89 户, 居民 290 人, 主要经营农家乐等旅游产业, 工程日处理生活污水 50 t. 整个村庄采用归一模块化的处理方式, 每家产生的生活污水依靠地势差自流式原理依次经过水解槽、地下管网、调节池后进入由 6 台新型净化槽串联组合的系统, 其中 3 台净化槽串联后与另外 3 台串联的净化槽进行并联(图 9), 可以通过调节各净化槽的曝气方式, 实现 A/O/A/O 工艺, 达到低能耗脱氮效果, 也可以根据污染物浓度或水量的变化, 实现全曝气好氧过程, 达到更高的处理能力, 使出水达标排放. 表 3 是天津市蓟州区桃花寺村日处理 50 t 生活

污水的进出水水质,可以看出出水水质较好,但对于水源地区域来说,富营养化的问题需要引起重视,即使出水中磷含量只有 5 mg/L,也需要进一步处理. 考虑到长期稳定的处理效果,电解法和湿地都有各自的缺点,所以研究团队采用化学方法,投加与磷含量相匹配的硫酸铁,使水中离子态的磷酸根离子与铁离子作用生成难溶解的磷酸铁沉淀. 具体措施是向其中一列 3 台串联的净化槽系统中最前端净化槽的第一格中投放药剂硫酸铁,溶解后的铁离子随水流在之后的多级净化槽中与水中的磷酸根离子发生作用,实现沉淀除磷,而另一列串联净化槽中不投放药剂. 通过该对比实验发现,由于磷含量低,投加的少量硫酸铁对微生物的代谢没有影响,而产生的难溶解的磷酸铁随净化槽出水排放到环境中,但是难溶解的磷酸铁即使进入水体也不会像离子态磷酸根离子一样造成严重的水体富营养化. 该示范工程证明开发的多台串并联系统不仅投资成本低,工期短,而且运行费用较低,还可以与反硝化作用和化学除磷法结合,实现较好的脱氮除磷效果.



图9 多台净化槽串并联系统的示范工程(50 t/d)

Fig. 9 parallelly connected multiple purifying tanks (50 t/d)

表3 天津市蓟州区桃花寺村日处理 50 t 生活污水的进出水水质

Tab. 3 Quality of influent and effluent water in Taohuasi village, Jizhou, Tianjin City(50 t/d)

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)
进水	160	81.8	24.4
出水	24	4.9	4.6
项目	TP/(mg·L ⁻¹)	pH	SS/(mg·L ⁻¹)
进水	3.9	7.1	23
出水	5.3	7.8	—

注:—表示数值太小,可以忽略.

4.2.4 山东省德州市双一集团

由于我国经济的飞速发展,在广大农村地区也有很多工业园区或者小型企业,它们距离城镇污水处理厂较远,产生的生活污水如果直接排放,也同样会污染环境,迫切需要处理. 本研究团队开发的多台净化槽串并联处理系统能够灵活地根据不同厂区的大小或车间的职工人数确定处理规模,从而选择不同的串并联形式,有效地进行原位处理,节省管网建设费

用. 于 2014 年在山东省德州市双一集团的两家分厂分别安装了 6 套净化槽串并联处理系统,处理生活区和车间产生的污水,日处理水量为 12 ~ 24 t. 2014 年 12 月 21 日安装了日处理 18 t 的处理系统,安装完后随即启动微生物的挂膜,尽管是冬季,生物挂膜速度较慢,但处理效果越来越好. 山东省德州市双一集团废水处理效果如图 10 所示. 由图 10(b)可知,投菌后由于气温很低,一个半月后出水仍然显黄色,但是图 10(c)显示两个半月后出水水质变得透明,图 10(c)从右向左依次为化粪池出水、前端净化槽中第一个区域和第三个区域的水样、后端净化槽中第一个区域和第三个区域的水样,经实验分析出水水质 BOD₅ 为 6.5 mg/L, NH₃-N 为 5.2 mg/L.



(a) 安装后的净化槽 (b) 2015-02-08 水样 (c) 2015-03-08 水样

图 10 山东省德州市双一集团废水处理效果图

Fig. 10 Wastewater treatment in Shuangyi Corporation, Dezhou City, Shandong Province

2016 年 5 月对另一家分厂的 5 个车间和 3 个食堂产生的生活污水进行了处理,直接在车间的附近分别串联安装了五套新型净化槽系统,夏季启动反应器,启动速度很快,一个月后出水变得清澈透明, BOD₅ 达到了国家一级 B 排放标准,为企业创造了环保效益,实现了政府规定的水质排放要求.

5 结 语

未来我国农村生活污水的处理将是环境保护工作的重点领域,然而为了保证工程能够真正长期、有效地运行,迫切地需要形成一套完善的理论体系和可靠的技术保障. 农村生活污水的归一模块化处理模式是本研究团队在长期的理论探索和工程经验总结的基础上提出的,适合处理不同地域、不同生活模式下产生的农村生活污水,而且对分散的企业产生的生活污水同样具有很好的原位处理效果. 应用该模式进行生活污水的处理,兼顾了节能和减排,并且能够长期稳定运行,出水水质均达到了 GB 18918—2002 《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准,具有很大的商业化推广价值和前景. 实践已经证明

归一模块化处理理论的科学性和合理性,必将成为我国农村生活污水处理的重要模式。

参考文献:

- [1] 国务院人口普查办公室. 中国 2010 年人口普查资料 [M]. 北京:中国统计出版社,2012.
- [2] 马静颖,詹建益. “五水共治”背景下浙江省农村生活污水处理现状分析研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(2): 64-68.
- [3] 白晓龙,顾卫兵,沃飞,等. 农村生活污水处理技术与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2008(6): 59-62.
- [4] 入山文郎. 净化槽的维护管理[M]. 日本:环境装备教育中心,2004.
- [5] 侯京卫,范彬,曲波,等. 农村生活污水排放特征研究述评[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 964-967.
- [6] 何安吉,黄勇. 农村生活污水处理技术研究进展及改进设想[J]. 环境科技, 2010, 23(3): 68-71.
- [7] 蒋克彬. 农村生活污水分散式处理技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [8] Gomez E, Casellas C, Picot B, et al. Ammonia elimination processes in stabilisation and high-rate algal pond systems[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(12): 303-312.
- [9] Young P, Buchanan N, Fallowfield H J. Inactivation of indicator organisms in wastewater treated by a high rate algal pond system[J]. Journal of Applied Microbiology, 2016, 121(2): 577-586.
- [10] 黄翔峰,池金萍,何少林,等. 高效藻类塘处理农村生活污水研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(5): 35-39.
- [11] Park J B K, Craggs R J, Shilton A N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 35-42.
- [12] Hench K R, Bissonnette G K, Sexstone A J, et al. Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands[J]. Water Research, 2003, 37(4): 921-927.
- [13] 应俊辉. 利用人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(4): 1104-1105.
- [14] 付融冰,杨海真,顾国维,等. 潜流人工湿地对农村生活污水氮去除的研究[J]. 水处理技术, 2006, 32(1): 18-22.
- [15] Wu S, Austin D, Liu L, et al. Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(6): 948-954.
- [16] 徐和胜,付融冰,褚衍洋. 芦苇人工湿地对农村生活污水磷素的去除及途径[J]. 生态环境学报, 2007, 16(5): 1372-1375.
- [17] Keesstra S D, Geissen V, Mosse K, et al. Soil as a filter for groundwater quality[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4(5): 507-516.
- [18] Murakami M, Sato N, Anegawa A, et al. Multiple evaluations of the removal of pollutants in road runoff by soil infiltration[J]. Water Research, 2008, 42(10): 2745-2755.
- [19] Magesan G N, Williamson J C, Yeates G W, et al. Wastewater C:N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery[J]. Bioresource Technology, 2000, 71(1): 21-27.
- [20] Chen X, Luo A C, Sato K, et al. An introduction of a multi-soil-layering system: A novel green technology for wastewater treatment in rural areas[J]. Water and Environment Journal, 2009, 23(4): 255-262.
- [21] 薛媛,武福平,李开明,等. 农村生活污水处理技术应用现状[J]. 现代化农业, 2011(4): 41-44.
- [22] Renou S, Givaudan J G, Poulain S, et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(3): 468-493.
- [23] 王然,王昶,杜晓雪,等. 高效自流式家庭生活污水净化槽的研究[J]. 环境工程, 2007, 25(5): 21-24.
- [24] Ye C, Hu Z B, Kong H N, et al. A new soil infiltration technology for decentralized sewage treatment: Two-stage anaerobic tank and soil trench system[J]. Pedosphere, 2008, 18(3): 401-408.
- [25] 王昶,杜晓雪,贾青竹,等. 家庭生活污水分散处理净化槽的研究[J]. 水处理技术, 2008, 34(2): 79-82.
- [26] 王昶,卜宇岚,贾青竹,等. A²/O 滤床生活污水净化槽的特性研究[J]. 天津科技大学学报, 2008, 23(2): 1-5.
- [27] 王昶,刘楠,贾青竹,等. 净化槽中生物滤床对家庭生活污水处理的水质影响[J]. 水处理技术, 2009, 35(10): 73-77.
- [28] 王昶,王智成,刘楠,等. 生物滤床对净化槽处理生活污水水质的影响[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 18-21.
- [29] Wang C, Wang Z C, Fang B, et al. Influence of bio-filter bed on treatment of domestic sewage in purifying tank [J]. Advanced Materials Research, 2011, 183: 1009-1013.

(下转第 27 页)