

华北地区傍水村落生活污水处理研究

范正锐 韩文书

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 农村村落由于相对较为分散,污水排放情况差异较大,污水管网建设缺乏,致使农村地区污水收集率和处理率较低,造成附近河流水体污染。本文以华北某地区傍水村落污水处理实际工程为对象,介绍了华北地区农村污水排放特征,如污水水量、水质、排放要求、污水收集方式等,并重点分析了不同生化处理技术和生态处理技术的原理和优势等。农村污水治理应根据当地污水排放特征,综合考虑财政投资、后期维护等因素,采取因地制宜、分类治理的措施。

[关键词] 农村生活污水; 治理技术; 人工湿地; 生化处理; 生态处理

[中图分类号] X703 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1008-5122(2022)06-0069-05

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.06.015

0 前言

我国华北地区属于严重缺水地区,人均水资源占有量不到 200 m^3 ,约占全国的 $1/10^{[1]}$,而华北地区也是我国水污染形势较为严峻的地区,水污染和水资源浪费问题加剧了水资源的缺乏。农村生活污水的乱排放影响周围水环境,进而影响整个农村的生态环境。2018年2月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《农村人居环境整治三年行动方案》再次提出梯次推进农村生活污水治理的重点任务^[2]。加强农村污水治理、提高污水处理效率对改善农村人居环境、建设美丽乡村具有重要的意义。尤其是傍水村落,由于其临近地表水体,其生活污水治理可显著改善流域水环境。

本文以华北某地区傍水村落污水处理实际工程为对象,介绍农村生活污水排放特征,重点分析了不同生活污水处理技术和方法的原理及优势,同时,针对不断提高的流域排放要求,提出适用的深度处理技术,以期为其他同类项目提供借鉴和参考。

1 华北地区傍水村落生活污水特征

1.1 村落特征

华北地区村落相对较为分散,绝大部分农村缺

乏完善的排水系统和处理设施,污水处理率远低于全国平均水平。有些村庄村内污水横流,对村容环境造成很大影响,同时严重污染地表或地下水体。农村污水排放现状主要包括三种情况:1)靠近流域水体的村庄,污水直接排入流域水体;2)距离水体相对较远的村落,污水通过支渠河沟间接排入流域水体;3)对于一些地势较低、距离较远、不能连通流域水体的村庄,污水就近排入附近坑塘、自行消纳或漫流蒸发。

1.2 污水排放高峰期

华北地区农村生活污水日排放主要集中在早上和晚上,季节性排放最高集中在6—9月份和春节所在月份,最低集中在12月份和1月份,这符合北方农民夏季用水多、冬季用水少的生活习惯^[3]。华北地区农村污水人均日产生量和污染物浓度均小于南方发达地区的农村,主要是由于北方农村仍然保持着自然村落的特征,外来人员以及工业企业等产生的生活污水相对较少。

1.3 污水水量特征

农村居民由于没有形成规模化的小区,组成较为分散,因此其生活用水量受单个家庭单元影响较大,同时受用水方式、污水排放形式、生活习惯等因素直接影响,存在较大的差异性,一般可按表1中的数据对华北地区的农村居民用水量进行估算,也可以采用调查问卷的形式,设置不同的条件调查不同情景下的用水量。

1.4 污水水质特征

华北地区农村生活污水具有排水规律性不强、

[收稿日期] 2022-07-25

[作者简介] 范正锐(1983—),女,河北赤城人,硕士,工程师,主要从事区域市场管理和技术开发工作。

[引用格式] 范正锐,韩文书.华北地区傍水村落生活污水处理研究[J].有色冶金节能,2022,38(6):69-73.

表1 华北地区农村居民生活用水量参考取值

村庄类型	用水量/(L/(人·d))	备注
有水冲厕所,有淋浴设施	100~180	
有水冲厕所,无淋浴设施	60~120	排放系数取
无水冲厕所,有淋浴设施	50~80	用水量的
无水冲厕所,无淋浴设施	40~60	40%~80%

排水量和污染浓度低等特点,因此一般是结合国家对新农村建设的发展规划,设计预留一定的富余系数。华北某地区的生活污水参考水质见表2。

表2 华北某地区农村生活污水水质 mg/L

指标	COD	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TP	TN
进水	100~350	50~200	100~200	20~30	2.0~4.0	≤40

1.5 处理要求

由于我国农村地区污水排放特征差异显著,目前尚无统一的国家排放标准,许多农村地区的污水处理设施均参照执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)。随着2018年9月《关于加快制定地方农村生活污水处理排放标准的通知》的出台,我国目前已公布农村污水处理设施、水污染物排放标准正式稿及征求意见稿的省份共29个。本文所述工程属地为河北省,农村生活污水排放执行河北省地方标准《农村生活污水排放标准》(DB 13/2171—2015)中的一级A标准,具体指标见表3,同时满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)要求自行消纳或灌溉。

表3 河北省农村生活污水排放标准 mg/L

指标	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TP	TN
出水	≤50	≤10	≤10	≤5(8)	≤0.5	≤15

1.6 污水收集方法

华北地区农村人口密度低、分布分散,生活污水排放面广,因此农村生活污水的收集一般都是结合村落的实际情况,如村落常驻人口、地理位置、是否有规模化企业、人员是否集中等,采用不同的生活污水收集输送方法,如有些以村落为单位建立收集系统,有些几户共建分散收集系统,有些甚至独户建立。不同收集方式适用性见表4。

表4中的三种收集方式主要采用传统重力排水方式,在管网局部埋深较深的地方,通过增加压力提升的方式来解决埋深、投资和管理等问题。

表4 不同污水收集方式比较

污水收集模式	收集概况	适用情况
村落集中收集	根据规划铺设污水管网,所有污水通过管网收集进入独立的污水处理站集中处理	地势平缓,集中居住
几户分散收集	按不同区域,邻近几户铺设污水管网,分散收集处理	地势高低错落,住户分散
纳管收集	铺设统一管网,污水收集接入市政管网,进入污水处理站统一处理	靠近市政管网

2 污水治理措施

国家对于农村污水治理的指导原则为:因地制宜,坚持污染治理与资源利用相结合、工程措施与生态措施相结合、集中处理与分散治理相结合。根据这些原则,以及华北某地区的傍水村落生活污水排放特征,结合污水对流域水体的污染和潜在污染情况,采用因地制宜、分类施治的系统治理措施,对该地区的农村污水进行处理。主要治理措施如下:

1) 污水直排的村庄,一般自建有集中或分散的排污管网,污水直排水体,对流域水体的污染危害很大。针对这种情况,可采用集中铺设管网、建设分散式污水处理设施和污水处理站的方式进行系统治理。

2) 污水间接排放的村庄,一般自建有部分排污管网,污水间接排放水体,对流域水体危害较大。针对这种情况,可通过对现有排污口进行截污的方式进行末端治理。

3) 污水散排自行消纳的村庄,基本无自建排污管网,外排污水较少。针对这种情况,有条件的可建设污水处理站或分散处理设施,无条件的改善厕所等卫生措施,通过分散处理的方式解决外排污水的问题,污水经过处理后就近排入附近坑塘或农灌回用。

在分类治理的基础上,尽量采用地上可移动式、可重复利用的处理设备,最大限度地降低农村污水治理重复投资的问题,与规划冲突时可直接移动再次利用设备。同时响应国家号召,可利用5G网络等建立云平台监控,实现手机/电脑端远程监控,提高农村污水运维管理水平,为政府管理部门的实时监控、管理、决策提供强有力的支撑。

3 傍水村落污水处理适用技术

除了传统的人工强化处理技术外,农村生活污

水的处理技术选择,更多要考虑如何根据农村特点和人口居住形式收集农村污水,以及考虑当地的财政和项目资金投入、项目工程的后期维护和运行等情况,以有限的财政资源实现可持续的废水处理。因此,根据华北地区傍水村落的综合情况,可选择生化处理技术和生态处理技术进行组合,实现农村生活污水处理的可持续运行和稳定达标。

3.1 生化处理技术

生化处理技术是一种传统的污水处理技术,主要通过一定的方式使排放的废水与微生物充分接

触,利用微生物异养特征来消化和分解水体中的 COD,同时利用微生物的硝化和反硝化作用以及噬磷作用等去除水体中的氨氮和磷。在这个过程中,某些无机毒物(如氰化物、硫化物等)也可以被微生物转化为无毒的无机物。因此,生化处理工艺常用于生活污水这类容易被降解的废水处理,一般分为好氧、厌氧和兼氧生物处理。常用生化处理技术主要有生物接触氧化、膜生物反应器、生物转盘技术和 MBBR 技术,其处理工艺特点对比见表 5。

从表 5 对比可以看出,MBBR 具有工艺能耗低、

表 5 常用农村污水生化处理工艺比较

项目	生物接触氧化	膜生物反应器	生物转盘技术	MBBR 技术
出水水质	一级 A 标	结合超滤设备达一级 A 标	结合过滤设备达到一级 A 标	一级 A 标
主要设备	提升泵、鼓风机、加药设备、生物反应器	提升泵、鼓风机、膜成套设备(自吸泵、反洗泵、加药系统等)	提升泵、生物转盘、过滤设备	提升泵、鼓风机、加药设备
占地面积	停留时间长,占地面积大	生化池后需要膜池和膜清洗池,有复杂的膜清洗系统,机房较大,占地面积大	转盘后需接滤池或二沉池,占地面积大	同步硝化和反硝化,污泥负荷高,占地面积小
全厂能耗	鼓风机连续运行,能耗大	鼓风机主要为生化池供气和满足膜抖动(防止膜污染),系统使用各类泵多,因此耗能大	无鼓风机设备,但是有膜片驱动装置,能耗一般	主要耗电设备为鼓风机,能耗低
操作管理	系统运行方式固定,过程不可调	较复杂,机械设备较多,维护量大,膜日常维护复杂(需反冲洗、化学清洗),每 3~5 年需要更换膜,涉及二次投资,对维护人员有一定的技术要求	维护程度要求高,盘片易坏,需更换,后续滤池也需经常维护	运行简单,管理方便,运行可调,灵活性高

运维简单的特点,非常适用于农村污水处理。MBBR 移动床生物膜反应器是一个集生物接触氧化和传统流化床特点于一体的移动式反应器,运行稳定可靠,适用于不同的农村生活污水,抗冲击负荷能力

强,是一种经济高效的污水处理工艺。此外,为了强化脱氮除磷的效果,可采用 $A^3/O + MBBR$ 工艺,增加预脱硝区、厌氧区、缺氧区和好氧区,其工艺流程如图 1 所示。

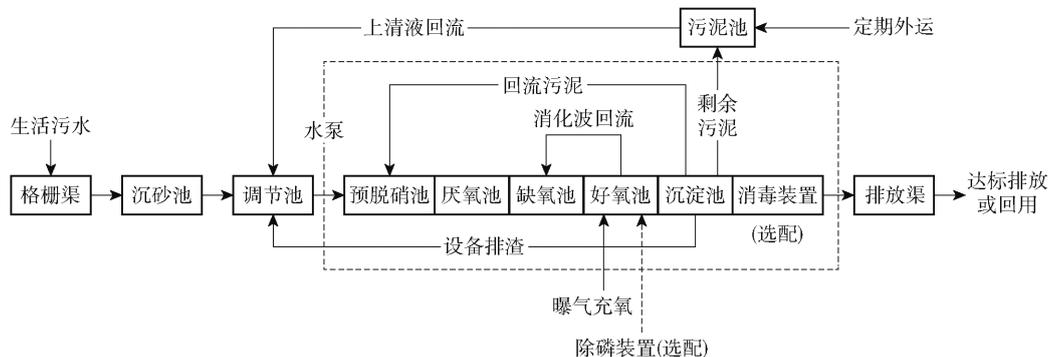


图 1 MBBR 技术工艺流程图

A^3/O 是对传统 $A/A/O$ (即 A^2/O) 工艺的高效升级,增加了生化反应链条,同时还更加明晰地区分了预脱硝区、厌氧区、缺氧区和好氧区。尤其是在最前端增设的预脱硝区,能够大量去除回流混合液中携带的硝酸盐,确保后续反应厌氧聚磷菌的优良环

境,更好地实现同步硝化和反硝化,大大缩短了后续的停留时间,也减少反应器的容积设计,提高反应系统的生物处理能效,强化脱氮除磷的效果。由于设置不同反应区去除硝酸盐,MBBR 工艺在处理污水的同时,大幅度降低了有机污泥的产量,减少了后续

含有机碳污泥的处理难题,实现了减污降碳协同增效。

A³/O + MBBR 工艺由于区分了更多的功能单元,具有以下特点:1)各个单元独立设计,可相互组合,占地面积小;2)因地制宜,集中与分散处理相结合,减少管网建设;3)各个单元可独立设置监控,实现对功能区的数字化管理;4)模块化组装设计,根据实际情况选择功能,独立运输和安装,方便快捷;5)可全封闭式运行,防止处理过程中的恶臭等大气污染物溢散;6)个性化外观设计,可与周围环境整体协调。

华北地区某傍水村落生活污水治理项目采用的 MBBR 工艺主要设计参数见表 6。

表 6 MBBR 主要设计参数

反应单元	溶解氧浓度/mg·L ⁻¹	曝气方式	水力停留时间/h
预脱硝区	0.2~0.5	间歇曝气	0.6
厌氧区	0.1~0.2	间歇曝气	1.0
缺氧区	0.2~0.5	间歇曝气	4.0
好氧区	2.0~4.0	间歇曝气	4.8
合计	—	—	10.4

其中,好氧区污泥浓度 3 500 mg/L,生物膜上污

泥浓度 15 000 mg/L,悬浮填料采用生物量递增海绵体填料,硝化液回流比 100%~200%,污泥回流比 50%~100%,COD 容积负荷 0.2 kgCOD/m³·d,硝化容积负荷 0.22 kgNH₄⁺-N/m³·d,系统沉淀池表面负荷 0.5~0.75 m³/m²·h。不同处理规模曝气量及装机功率见表 7。

表 7 不同规模曝气量及装机功率

处理规模/m ³ ·d ⁻¹	30	50	100	150	200
曝气量/m ³ ·min ⁻¹	0.35	0.58	1.17	1.75	2.34
装机功率/kW	1.13	1.35	2.42	2.95	3.78

3.2 生态治理技术

传统意义上的污水生态处理技术是指根据当地实际情况,运用生态学、景观学和水文动力学等原理对污水进行生态化处理,处理后的水还可循环利用。通常是设计一个生态环境(如人工湿地等),利用人工生态环境中的土壤、植被、微生物等复合生态系统,通过物理吸附、化学反应、生物降解和生物吸收利用等作用,对污水中的污染物进行去除。传统的污水生态处理技术有土壤渗滤系统、人工湿地、稳定塘系统和生物强化滤床等,其工艺特点见表 8。

表 8 常用生态处理技术比较

技术	去污效果	运行费用/(元·m ³)	占地	使用范围	缺点
土壤地下渗滤系统	BOD ₅ 、TP > 80%, COD、TN 去除率在 60% 左右	基本无运行成本	小	地势平坦、地基好的地区	长期处于地下,系统内氧气含量不足,削弱了系统的处理能力
人工湿地	COD > 80%, BOD ₅ 、TSS > 80%, TN 约 50%, TP > 80%	0.05~0.1	较大	地势平坦、坡地、居住相对集中的中、小村庄	占地面积大,易受病虫害影响,稳定运行所需时间长
稳定塘	COD > 70%, BOD ₅ 、TSS 病原体、NH ₄ ⁺ -N 去除效果较好,脱氮除磷差	0.05	较大	水资源匮乏、拥有自然池塘或闲置沟渠地形的村庄	占地面积大、水力停留时间较长、散发臭味、处理效果不稳定
生物强化滤床	COD、TN、TP、NH ₄ ⁺ -N 的去除率分别在 81%、66%、89% 和 82% 左右	—	较小	人口居住较为分散的农村地区	蚯蚓等生物活动易受季节影响

从表 8 对比可以看出,人工湿地具有良好的运行效果和较高的处理效率。尤其在新农村建设中,人工湿地兼具景观和休闲游玩效果,因此得到很好的推广。人工湿地污水处理技术通过模拟天然湿地的结构与功能,可以根据实际地形进行多样化的设计。在设计的过程中,又可以根据进水特点针对性地处理污染物,比起自然湿地有着更好的污染物处理效果。人工湿地系统如图 2 所示。

人工湿地处理技术是利用了天然土壤和砂石的过滤和吸附作用、各种植物和微生物的化学反应和生物作用等协同效果,对污水进行高效净化处理^[4]。除了

对污水中的 COD 和 BOD 有较好的去除效果外,通过土壤中的微生物和湿地植被,人工湿地也有很好的脱氮除磷效果。此外,还有研究表明湿地植被如芦苇、香蒲和灯心草等对病原体有很好的去除效果。人工湿地有潜流湿地和表面流湿地两种,由于潜流湿地具有更好的处理效果和更大的设计空间,因此我国主要以潜流湿地为主。人工湿地技术适用于资金短缺、土地面积相对丰富的农村地区,不仅可以治理农村水污染、保护水环境,而且可以美化环境,节约水资源。

3.3 提标改造技术

随着流域污染物排放要求的提高,现有工艺技

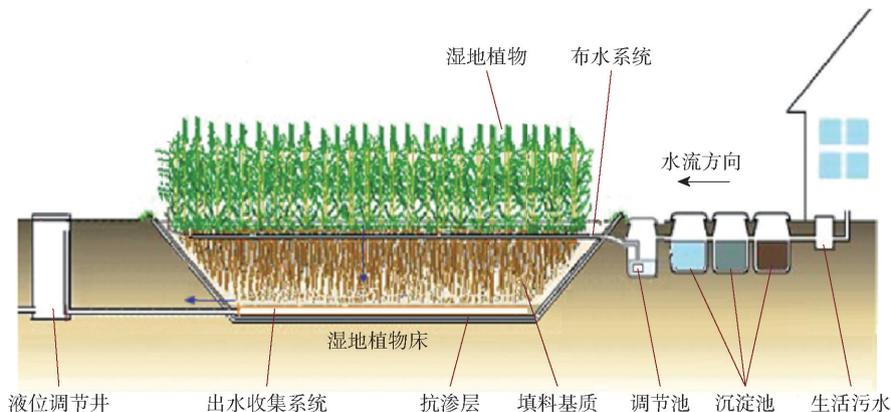


图2 人工湿地系统示意图

术无法满足更高处理要求,例如流域污染物排放要求 COD 限值为 30 mg/L,这就要求对现有的污水处理工艺技术进行提升改造。对新建的污水处理设施,直接选用更高标准的处理工艺或设置工艺组合。对已建成的污水处理设施,需要对原有工艺技术进行提标改造,可以通过在后端增加深度处理技术来实现。可供选择的提标改造技术主要有 MABR 膜曝气生物膜反应器技术、催化臭氧氧化技术等。

4 结束语

根据华北地区傍水村落污水排放特征,结合项目综合情况,考虑当地的财政和项目资金投入、项目工程的后期维护和运行等情况,以有限的财政资源实现可持续的处理效果,选择生化处理技术和生态处理技术进行组合,实现农村生活污水处理的可持续运行和稳定达标。

农村污水治理不仅仅涉及污水,还涉及粪便的

资源化,更是整个社会环境治理、资源循环的一部分,关乎整个农村人居环境的改善。污水治理不仅要治,更要管,如何做好后期的运营维护管理,更是要重点考虑的问题。

[参考文献]

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 农村人居环境整治三年行动方案[EB/OL]. [2018-02-05]. http://www.gov.cn/zhengce/2018-02/05/content_5264056.htm.
- [3] 张磊, 裴国霞, 张玉华, 等. 华北平原地区农村生活污水产污特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 410-415.
- [4] HUAN Y Q, ZHANG M, XU Y X. Optimizing substrate gradation for constructed wetland treating domestic wastewater[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(3): 130-134, 138.

Research on Domestic Wastewater Treatment in a North China Waterfront Village

FAN Zheng-rui, HAN Wen-shu

Abstract: The scattered geographic locations of rural villages, disparate local sewage discharge conditions, and a common lack in sewage network construction result in the low rate of sewage collection and treatment and the subsequent threat to pollute local water bodies in rural areas. This paper took a wastewater treatment project in a North China waterfront village as example, to introduce the characteristics of rural wastewater discharge in North China, such as wastewater quantity, water quality, discharge requirements, wastewater collection methods, etc., and to analyze with emphasis the principles and advantages of different biochemical and ecological treatment technologies. Rural wastewater treatment should be based on local sewage discharge characteristics, while taking into account financial investment, maintenance and other factors, and adopt classified treatment measures tailored to local conditions.

Key words: rural domestic wastewater; treatment technology; artificial wetland; biochemical treatment; ecological treatment