

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.011

## 负压排水技术在乡村污水收集中的应用

张健<sup>1</sup>, 李孟飞<sup>2</sup>, 李萌<sup>1</sup>, 许向阁<sup>3</sup>

(1. 万若<北京>环境工程技术有限公司, 北京 100083; 2. 邯郸市永年县南界河店村村委会, 河北 邯郸 057150; 3. 北京万若环境工程技术有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 常规重力流管道+提升泵站的排水方式用于乡村污水收集时,存在收集率低、建设费用高、雨污难以分流等问题。因此,管径小、布置灵活、流速快、施工对周边扰动小、可收集高浓度污水的负压排水技术更适合乡村污水收集,其改进、提升和优化上值得关注。提出了乡村负压排水的4种基本形式,即室内重力流室外负压混合收集、室内负压厕所室外负压混合收集、室内重力流室外负压分质收集、室内负压厕所室外负压分质收集,并介绍了具体案例。该案例的实践表明,负压排水技术可规模化收集高浓度黑水,为黑水的资源化利用提供了新的技术手段。

**关键词:** 负压排水; 源分离; 乡村污水收集与治理

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0066-06

## Application of Negative Pressure (Vacuum) Drainage Technology in Collection of Rural Sewage

ZHANG Jian<sup>1</sup>, LI Meng-fei<sup>2</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, XU Xiang-ge<sup>3</sup>

(1. EnviroSystems Engineering & Technology Co. Ltd., Beijing 100083, China; 2. Village Committee of Nanjiedian Village in Yongnian County, Handan 057150, China; 3. Beijing EnviroSystems Environmental Engineering Co. Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** When the conventional drainage mode of gravity sewer combined with lifting pump station is applied in rural areas, there are problems such as low collection rate, high construction cost and difficult diversion of rainwater and sewage. Therefore, the negative pressure drainage technology is more suitable for rural sewage collection with small pipe diameter, flexible arrangement, fast flow rate, small disturbance to the periphery of construction, high concentration sewage collection. So its improvement, lifting and optimization deserve attention. Four basic patterns of rural negative pressure drainage are put forward, namely indoor gravity flow + outdoor negative pressure mixed collection, indoor negative pressure toilet + outdoor negative pressure mixed collection, indoor gravity flow + outdoor negative pressure separation collection, indoor negative pressure toilet + outdoor negative pressure separation collection, and the specific case is introduced. The practice of this case showed that the negative pressure drainage technology could collect high concentration black water on a large scale, which could provide a new technical means for the utilization of black water resources.

**Key words:** negative pressure (vacuum) drainage; source separation; rural sewage collection

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403401、2018YFC1903206)

and treatment

2016年12月国务院发布《“十三五”生态环境保护规划》,要求加快农业农村环境综合治理,整县推进农村污水处理统一规划、建设、管理。积极推进城镇污水、垃圾处理设施和服务向农村延伸,开展农村厕所无害化改造。继续实施农村清洁工程,开展河道清淤疏浚。到2020年,新增完成环境综合整治建制村13万个。《全国农村环境综合整治“十三五”规划》(环水体[2017]18号)也明确,“十三五”期间,农村环境综合整治主要任务包括农村饮用水水源地保护、农村生活垃圾和污水处理、畜禽养殖废弃物资源化利用和污染防治。随着农村给水的普及和人民生活水平的提高,农村生活污水排放量不断增加,但农村生活污水与城市生活污水相比,水量小、排放分散、水质复杂,水质水量随地区和时间变化差异较大,亟需实施灵活的可符合不同实际需求的新技术,逐步建立完整的农村污水收集和处理体系。

### 1 常规排水方式在乡村应用中的一些问题

污水管理系统中,在管网完善的国家污水收集的费用在收集和处理的总费用中占相当高的比例,如德国的统计和案例显示,收集管道费用占总费用的70%以上。我国乡村污水整体上尚处于起步阶段,但行业内已经开始认识到污水收集的高费用以及对后续处理的重要性。

对近年来常规排水方式(重力流管道加提升泵站)在乡村的应用情况进行了总结和分析,可大致归纳如下:

① 水量的不确定性<sup>[1]</sup>。乡村内人均/户均管道长度远大于城镇,此外排水量波动大,平时外出务工比例高,“空心村”现象突出,节假日与平常的污水量不均衡。

② 收集率低,维护费用高。水量低时流动性差,水量大时由于沉积物的影响流动不畅,大量的检查井成为雨水和地面渣土的接纳口,化粪池尤其在雨季或者管网被堵塞的情况下污水外溢的现象严重,给环境造成了恶劣影响,污水处理站进水碳氮比严重失调。

③ 建设费用高。一般农村地面很大一部分已经硬化,且地面以下很多已经存在自来水等管道,若新增污水管网则意味着要先破坏已有硬化地面后再重新硬化。

### 2 有压排水技术与特点

从19世纪中叶开始,重力流管道加提升泵站开始在欧洲、北美以及亚洲的日本普及应用,以解决城市区域污水、雨水的排放,至今形成了排污排水的绝对主流形式(常规模式)。

排水管网可分为常压排水管道和有压排水管道,后者又分为压力管道和负压管道,具体如图1、2所示。

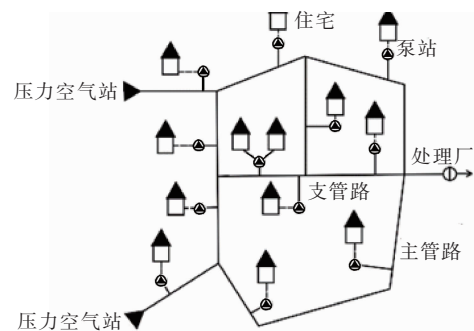


图1 压力管道排水系统

Fig. 1 Pressure pipe drainage system



图2 负压排水系统

Fig. 2 Negative pressure drainage system

压力排水通常在各个排水点或者重力流排水的汇集点安装污水提升泵将污水提升至压力管道,通过各个点设置的止逆系统避免主管道污水倒灌。由于管道处于满管状态,为防止污水在管道中形成沉淀和堵塞,定期通过压力气进行清扫。该方法的优点是污水泵提升能力强,主要缺点是系统维护难,各个排放点需要强电驱动,尤其在排水点多的情况下系统可靠性较差。

负压排水在各个排水点设置污水与负压管道相连接的适配装置,当污水液位达到设置高度时,负压界面阀利用负压管道中的负压作为驱动力自动被打

开,污水通过负压和大气环境压力的差被吸入管道,流向负压收集中心。污水吸入过程中配有一定量的空气,达到对管道的自清洗效果。对于有收集率要求的且污水排放点多而散以及地形地质条件较复杂的应用场景,负压排水是常规重力流排水方案的一个有竞争力的替代方案;与压力排水管道相比,负压排水的局限是单次提升能力(2~4 m)有限,一次提升高度过高时需要特殊解决方案,如与压力排水结合并用。

### 3 负压排水技术的发展

在欧洲开始大规模普及推广重力流下水道的浪潮下,荷兰人 Liernur 发明了气动下水道系统(见图3),并将其不断完善和产业化,除阿姆斯特丹外,负压排水当时在多个地区和城市得到过应用,如巴黎、柏林等。到了1905年阿姆斯特丹有近5 000个厕所与负压排水系统相接,收集到的粪尿可以继续作为资源利用。

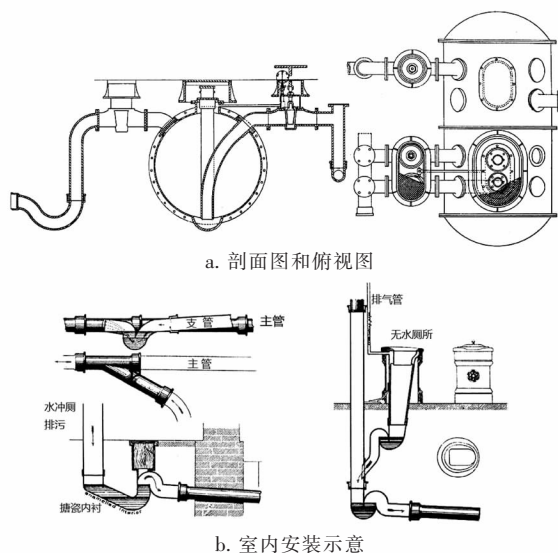


图3 Liernur 负压排污系统

Fig. 3 Liernur negative pressure drainage system

由于当时的多相流输送理论和控制技术的发展水平还十分有限,加之合成氨工艺的发明和产业化(1910年—1913年),导致该排水技术的消失。负压排水技术直到20世纪五六十年代才有了提升,可以实现污水的即来即排,系统连续运行,并在船舶排水中得到应用。20世纪70年代,市政排水系统开始有规模化商业应用,但此时在欧洲已经错过了下水道大规模兴建的时期,负压排水在海滨建筑、水源保护地、地形复杂重力流难以下管或地下水位高等

领域成为一个替代方案而得到应用,由于市场应用有限,负压排水本身在过去几十年中技术的开发和提升并不明显。

在我国的城乡一体化和乡村振兴中,为了加快农业农村环境综合治理,针对农村规模、密度、环境要求和可持续绿色发展新目标,在负压排水技术的改进、提升和优化上值得深入和创新。

2005年,我国引进德国技术在上海国际赛车场对卫生设施排出的废水进行负压管道收集<sup>[2]</sup>。2006年我国褐水、黄水分离型负压排水系统首次应用于清华大学环境节能楼,并进行了近7年的试验应用和跟踪研究,其中褐水采用负压管道收集、黄水采用重力流管道收集<sup>[3]</sup>,采用的粪尿分离厕所设计小便冲水0~0.1 L、大便冲厕0.5~0.8 L。2008年农村规模化黑、褐、黄、灰分离负压排水系统在北京小汤山试验应用<sup>[4]</sup>。针对国内的具体情况和应用条件,经典的负压排水技术不断进行本土化的提升,近10年来有了为数较多的商业化、规模化应用,如笔者所在团队完成的宁波城市综合体世纪东方商业广场负压排水(涉及面积 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$ )、大连国际会议中心等长期可靠运行的案例中已有超过10年的运行历史<sup>[5-6]</sup>,规模化的室外负压排水如广西金川防城港生产基地的负压排水工程覆盖近 $6 \text{ km}^2$ ,这些都为农村负压排水不同形式的应用奠定了技术基础并积累了工程经验。

### 4 乡村负压排水形式

常规重力流用于乡村污水收集以及处理的主要难点源于流动性较差的粪便水,针对我国乡村的不同需求,笔者结合已有的工程实践将乡村负压排水归纳为分质型和混排型等四种基本形式,具体如图4所示。

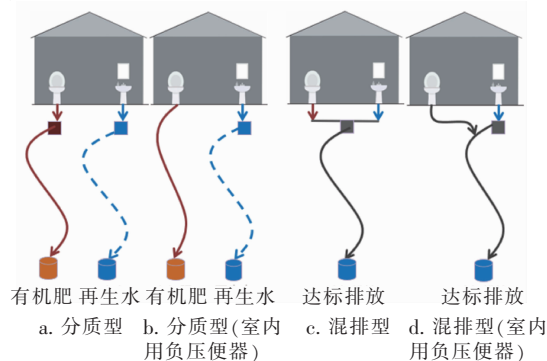


图4 乡村负压排水的几种形式

Fig. 4 Several forms of rural negative pressure drainage



### ① 分质型

黑水排放至室外的黑水负压收集器,在负压收集器内达到设定液位后排入负压管网实现集中收集。该方法较适用于已有收纳黑水的化粪池,通过增加负压适配器可实现黑水的单独集中收集与资源化利用,灰水由于污染负荷低可以进行分散处理,然后重力流排走或新增收集器通过负压管道集中收集。

### ② 分质型(室内用负压便器)

应用负压便器可以直接通过负压管网单独收集黑水,由于负压的作用可以实现节省冲厕水和收集容积小、浓度高的黑水。灰水可以采用重力流管道或通过负压收集器进入负压管网单独收集。

分质收集到的黑水可通过好氧稳定、厌氧或其他方法进行资源化处理,分质收集的灰水由于氮磷和有机物含量低,其处理工艺简单而可靠。

### ③ 混排型

污水混合排放至室外的负压收集器,汇集到设定液位后自动排入负压管网,经负压管网输送至负压站。该方法是解决重力流管道易堵塞以及堵塞后降雨化粪池往外溢水等问题的一个替代方案。

### ④ 混排型(室内用负压便器)

灰水(杂排水)单独排放至室外负压收集器,汇集到设定液位后自动排入负压管网。应用负压便器,直接将黑水(粪尿及其冲洗水)排入负压管网。混合污水经负压管网输送至负压站。该方法较适合

于缺水、有改厕需求以及干旱或寒冷地区。此应用情形下,负压便器与其他无水冲堆肥厕所相比可以方便地安装在室内,灰水的收集也可以在室内通过负压收集器收集。对于寒冷地区,该模式可有效减小室外污水管网的埋深,节省土建费用。

## 5 应用案例

生活污水中人的排泄物约占污水总量的1%~2%,但却含有污水中的大部分有机物和绝大部分的氮磷营养盐,量与质在比例上的反差、常规重力流在乡村污水收集遇到的困难、农村混合污水处理达标难以及以资源化为导向的管理理念产生了源分离排水体制的合理性<sup>[7]</sup>。

邯郸永年县南界河店村原来村民采用水窖存水,多数使用建在庭院里的旱厕,部分村民开始使用水冲厕,村里卫生条件较差,废水沿水沟排放或直接排到街道上。村委会在准备改善自来水供水条件时,面临用水量增加后将更为突出的污水问题。考察了建设化粪池后接重力流管道的案例和不同规模的村级污水处理站后,发现普遍存在建化粪池需占地、建重力流管网需要全面破坏已经硬化的路面、污水处理站运行难等问题。经过分析比较,村里决定利用改水契机,进行供排水一体化施工,自筹资金同时实施改厕、黑水灰水源分离负压排水的方式。沿街道边绿化带布设给水管网、分质排水管网,并在村边集中处理污水。

永年县南界河店村负压分质排水流程见图5。

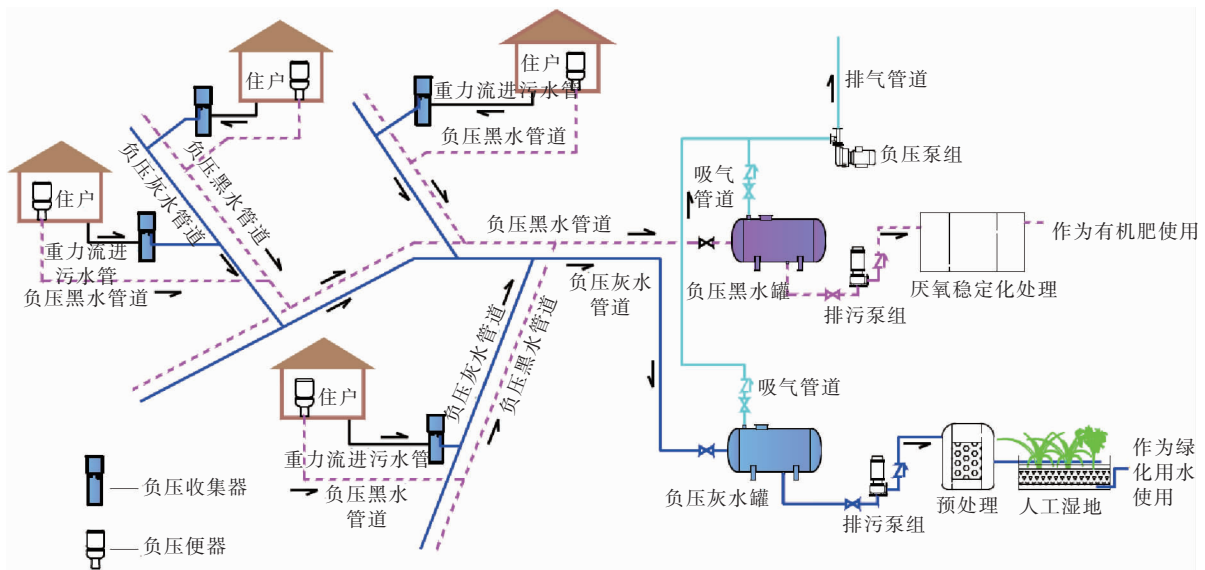


图5 负压分质排水流程

Fig. 5 Illustration of the negative pressure separated sewer system

村民根据各自实际情况选择便器在室内的安装位置,自来水管和排污负压管道沿墙边敷设,在合适位置分别与室外管网进行接驳。考虑到很多村民由使用旱厕直接转变到使用新型的负压便器,在冲厕方式上采用了感应冲厕,在使用者坐着如厕后自动冲水(冲水每次约1 L),而站立小便或向便器内倾倒残渣剩饭时,可以采用“只抽不冲”的冲厕模式。

灰水(洗碗、洗衣、洗浴的杂排水)沿户内原有管道汇集到室外的负压收集器,收集器汇水到设定液位后自动打开负压驱动的隔膜阀,将灰水输送到负压管网。灰水收集器在街道路边埋地安装。黑水和灰水管道分别沿道路两侧埋设,避免了破拆水泥/柏油路面。管道沿程需降低埋深时做了几处提升,平均埋深1.1 m。

污水分别收集到负压站后,黑水排入地埋式厌氧发酵池。村里原计划通过添加秸秆、畜禽粪便产生沼气,为村民提供燃气。由于后来政府实施了煤改气工程,所设的厌氧池仅作为黑水的稳定化处理,之后作为有机肥应用于该村的农业种植。灰水经格栅和沉淀池后通过人工湿地进行净化处理,达到一级A排放标准。

该系统2013年投入使用,收集及处理设施自动化运行,由村委会的兼职电工兼职负责日常的运行维护。该系统的直接运行费用仅为收集中心的电费,折合每户每月耗电5~6 kW·h,按电价为0.6元/(kW·h)计算(当地村民用电三档电价中的最高价),折合每户每月3~3.6元。该村水价3.5元/m<sup>3</sup>,人均耗水50 L/d,低于当地村庄平均水平。新型厕所节水5 L/次(常规节水便器冲厕耗水6 L,负压便器冲厕耗水1 L),该村每户3~5人常驻,按每户每天如厕7次计,每月节省水费3.7元,可以抵消黑灰水收集处理的直接运行费用。

该村还以黑水利用为契机发展有机种植,黑水替代化肥在有机种植园施用,构成了“排泄物-农业-食品”的物质循环模式。

## 6 负压排水与重力流排水比较分析

目前,关于我国农村常规排水全系统的费用资料比较缺乏,已有的负压排水案例也因资金来源多元,难以系统地进行费用比较。对负压排水和重力流排水相关项目的工程量进行了初步比较,结果如表1所示。

表1 负压排水和重力流排水对比

Tab.1 Comparison of negative pressure drainage and gravity drainage system

项 目	负压排水	重力流排水
户(院)内排水	黑灰合流制[以图4(c)为例]:常规重力流便器,重力流管道(de50~110),负压收集器(直径300~500 mm);分流制[以图4中(b)为例]:负压便器,黑水负压管道(de50),灰水重力流管道(de50),灰水负压收集器(直径300~500 mm)	常规重力流便器,重力流管道(de50~110),检查井(直径700 mm)
化粪池	不需要	需配置
室外管道及检查井	负压管道 de75~160,一般在冻土层以下0~300 mm 深度范围内敷设,可在一定高差内逆坡。不需检查井,管道每隔200 m 左右预留检查口(直径300 mm)	管道 de200~1 000,一般在冻土层以下0~5 000 mm 深度范围内敷设,需严格保持向下坡度。管道转弯处及室外管线每隔25 m 左右需设检查井(直径≥700 mm)
泵站	负压收集中心由负压罐、真空泵、污水泵及控制组成,单站服务面积可达到1~2 km <sup>2</sup>	污水提升泵站由污水井、污水泵及控制组成,管道在抵达污水站之前需增加污水提升泵站
管网施工	施工开挖面积及深度小,通常可避免或显著减少硬化地面的破坏;无防冻要求的情况下可明管敷设;工期较短;施工措施费较低	施工开挖面积大;对硬化地面破坏面积大;施工周期长;施工措施费较高
管网维护	流速较高(1~4 m/s),管道系统有自冲洗能力,不需要清掏疏浚	需定期清掏疏浚
污水收集效率与污水处理	管网污水无泄漏;有效实现雨污分流;由于污水“即来即排”,无化粪池或管道沉积造成的碳源损失;黑灰混排时,碳氮比较容易满足生物脱氮工艺的要求,黑灰分质收集时,黑水由复杂的净化工艺简化为营养物回收工艺,灰水污染负荷大幅度降低,净化工艺简化,对管理人员水平要求较低	管网污水泄漏率较高;雨污分流难;受化粪池及管道泄漏等因素影响,碳氮比难以满足生物脱氮工艺要求;对运维管理人员的需求较高,水质达标排放较难

## 7 结语

负压排水与重力流排水的比较分析以及笔者团队多年的实践显示,针对一个具体的村庄,以下因素会导致负压排水技术的应用具有明显的经济优势:①污水收集率有较严格要求;②污水处理排放指标

有较严格要求;③在乡村道路已经完成路面硬化的情况下施工;④在地形复杂或地下水位较高的地区施工;⑤在水源地等对管网渗漏管控严格的地区应用。

此外,负压排水技术使规模化收集高浓度黑水成为可能,通过黑水的肥料化、能源化,为乡村污水过去的单一净化处理提供了更多资源化利用的技术手段。

#### 参考文献:

- [1] 张健. 乡村排污系统的探讨[J]. 北京水务,2006(4): 49-51,60.  
Zhang Jian. The waste-water discharge system in the countryside[J]. Beijing Water,2006(4):49-51,60 (in Chinese).
- [2] 包虹,徐凤. 上海国际赛车场排水系统设计[J]. 给水排水,2005,31(5):65-69.  
Bao Hong, Xu Feng. Water drainage system design of Shanghai International Circuit[J]. Water & Wastewater Engineering,2005,31(5):65-69 (in Chinese).
- [3] 张健,章菁,高世宝,等. 资源型排水系统的探索与工程实践[J]. 给水排水,2011,37(11):155-159.  
Zhang Jian, Zhang Jing, Gao Shibao, et al. Study and practice of the resource-based drainage system[J]. Water & Wastewater Engineering,2011,37(11):155-159 (in Chinese).
- [4] Hao X D, Novotny V, Nelson V. Water Infrastructure for Sustainable Communities: China and the World [M]. London: IWA Publishing,2010.
- [5] 汪琦,章菁. 真空排水系统在大型商业广场建筑中的应用[J]. 工业用水与废水,2012,43(1):56-59.  
Wang Qi, Zhang Jing. Application of vacuum drainage system in large-scale commercial architecture [J]. Industrial Water & Wastewater,2012,43(1):56-59 (in Chinese).
- [6] 张健,高世宝,章菁,等. Envivac 真空排水技术及工程应用[J]. 给水排水动态,2011(2):22-25.  
Zhang Jian, Gao Shibao, Zhang Jing, et al. EnviVac vacuum drainage technology and applications[J]. Water & Wastewater Information, 2011 (2): 22 - 25 (in Chinese).
- [7] 张健,高世宝,章菁,等. 生态排水的理念与实践[J]. 中国给水排水,2008,24(2):10-14.  
Zhang Jian, Gao Shibao, Zhang Jing, et al. Concept and application demonstration of ecological sanitation [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24 (2): 10 - 14 (in Chinese).



作者简介:张健(1959- ),男,河北石家庄人,博士,总工,从事污水及废弃物资源化处理技术研究与开发工作。

E-mail:j. zhang@envi8.com

收稿日期:2019-05-14

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福