

农村生活污水处理微生物强化技术研究进展

吴凌彦, 陈咄圳, 郑向群

农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191

摘要 目前中国农村人居环境不一, 环保意识不到位, 基础设施差, 农村生活污水的排放量不断增加, 加剧了农村环境污染程度。通过分析国内外农村生活污水的处理工艺技术, 阐述了培育高效降解菌种技术、微生物固定化技术、构建微生物菌剂技术等微生物强化技术治理农村生活污水的原理、特点和技术难点, 并结合案例分析, 表明微生物强化技术能有效防止污泥膨胀, 比传统污水处理方法效率更高, 具备抗逆性、抗毒性和耐负荷冲击能力强等优点, 更适用于农村生活污水的治理。

关键词 农村生活污水; 废水生物处理; 微生物强化技术

依据第二次全国农业普查结果, 中国目前共有 65 万多个行政村, 登记住户人口近 8 亿^[1]。改革开放以来, 农民的生活水平得到了显著提高, 同时农村水环境污染现状也日益严峻。农村人居环境状况不平衡、脏乱差问题比较突出, 如生活污水随意排放, 畜禽产业大力发展带来大量养殖废水, 农田化肥、农药过量使用产生地表径流和地下淋溶等, 导致池塘、湖泊、地下水等水体严重富营养化^[2], 不仅直接影响农村居民的身体健康以及生活质量, 而且严重制约农村经济环境的可持续发展。据《住建部 2016 年城乡建设统计年鉴》^[3]统计, 中国乡镇集中供水率达到 81.44%, 但污水平均处理率只有 11.38%, 集中处理率仅有 6% (表 1^[3])。农村污水处理匹配度不高, 目前存在大部分污水直排问题, 进而引发水环境污染和生态退化。《乡村振兴战略规划 2018—2022 年》中指出, 农村环保是中国经济社会发展的重要方面。农村污水治理已经成为乡村振兴战略的重要内容, 摒弃技术不适用、效率不够高、管理运行不到位等

弊端, 建立高效、节能、低投入的污水处理系统是实现农村生活污水科学治理的重要前提。

表 1 镇、乡级行政区域污水处理设施情况

Table 1 Sewage treatment facilities at various township levels

项目	建制镇	乡	镇乡级 特殊区域
污水处理厂	3409	441	135
污水处理厂处理能力/(万 m ³ ·d ⁻¹)	1423	26	25
污水处理装置	12421	2093	162
污水处理装置处理能力/(万 m ³ ·d ⁻¹)	1041	38	18
排水管道长度/km	166305	17912	6498
排水暗渠长度/km	83154	12513	1501
污水处理厂集中处理率/%	42	6	49
污水处理率/%	53	11	59

生物降解是目前消减污水中污染物的主要途径, 但传统的污水处理系统普遍存在污泥易膨胀及对抗冲

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-11-02

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务 (CAAS-XTX2016015); 中央级科研院所基本科研业务费专项 (2018-2018-jbkyywf-CPZ)

作者简介: 吴凌彦, 硕士研究生, 研究方向为农村生活污水处理, 电子信箱: wlymusic@qq.com; 陈咄圳 (通信作者), 助理研究员, 研究方向为乡村环境治理; 电子信箱: chenpeizhencpz@sina.com; 郑向群 (共同通信作者), 研究员, 研究方向为乡村环境监测, 电子信箱: zhengxiangqun@126.com

引用格式: 吴凌彦, 陈咄圳, 郑向群. 农村生活污水处理微生物强化技术研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(23): 47-56; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.23.008

击负荷能力差等问题^[4]。微生物强化技术可以改善系统运行,并提高处理效率。经过学者研究,微生物强化技术已经广泛的应用于不同污染水体的治理,如含盐有机废水^[5]、印染废水^[6]、河道水沟^[7]等。将微生物强化技术应用用于农村生活污水治理,可以提高出水水质,减少对地下水的依赖,使出水可以回用于各项农业生产,提高农民用水安全,特别是对于中国水资源匮乏地区的农村用水有重要意义^[8]。

1 农村生活污水特点

农村生活污水是指居民生活过程中产生的厕所冲洗水、沐浴排水和厨房洗涤水等,以及分散养殖过程中产生的废水^[9]。农村生活污水的水质、水量和排放方式因各地经济发展水平和居民生活习惯不同而差异较大,其主要特点有^[10]:1) 氮、磷的含量高,且含有大量的营养盐类,基本不含重金属和有毒有害物质,污染物相对简单,可生化性强;一般pH值为6~8,SS(悬浮颗粒物

浓度) ≤ 500 mg/L,色度 ≤ 100 ,COD(化学需氧量)为250~400 mg/L,BOD5(5日生化需氧量)为120~200 mg/L,氨氮为40~60 mg/L、TP(总磷)为2.5~5.0 mg/L;2) 用水量增长快,污水中污染物浓度较低;3) 水质波动较大,排放点分散、区域排放特征差异显著。农村生活日渐城镇化,污水中有机物越来越多,如果不经处理或直接排放到河道湖泊中,会导致水体水质恶化,甚至出现黑臭现象,严重影响农村地区用水安全和地区环境面貌^[11],所以现阶段如何更好地处理污水是重中之重。

2 国外农村生活污水处理工艺技术现状

欧美、日本等发达国家在20世纪六七十年代就意识到农村水污染问题可能带来的严重后果,并以此开展了诸多农村生活污水处理工艺、运行以及管理维护模式等方面的研究。经过数年探索实践,已经研发出多种适合农村的生活污水处理技术。国外典型农村污水处理技术特点见表2^[12-16]。

表2 国外典型农村生活污水处理技术主要特点

Table 2 Main characteristics of rural domestic sewage treatment technology abroad

国家	技术名称	原理	应用现状及特点
美国	高效藻类塘系统	通过传统的稳定塘改进,对COD、BOD5、氨氮、总磷以及病原体等的去除率均较高,同时收割的高等水生植物是很好的肥料	高效藻类塘的优势是施工工程量少,投资及运行费用少,便于管理和维护。分散污水处理系统在美国农村应用的较多,这种技术常被用在人口密度较小的社区或乡村
法国	蚯蚓生物滤池	利用蚯蚓对有机物的吞食功能以及蚯蚓与微生物的协同作用,提升土壤渗透性,具有高效去污染物能力,同时还能降低剩余污泥量	蚯蚓生态滤池处理系统同时集初沉池、曝气池、二沉池、污泥回流设备等于一体,大幅度简化了污水处理流程。其优势是抗冲击负荷强,运行管理简便,不易堵塞等
德国	分流式污水处理系统	该技术分为两种。一种是分散市镇基础设施系统,即在没有接入排水网的偏远农村建造先进的膜生物反应器,平时把雨水和污水分开收集,然后通过先进的膜生物反应器净化污水。第二种是湿地污水处理系统。该工艺主要将农村生活污水通过水管道,汇集流入沉淀池,经过沉淀池的4层筛选之后,再经湿地净化处理,然后达标排放或用于农田灌溉	通过使用膜生物反应器和湿地污水处理系统处理的污水水质较高,可作为回流水以及作为灌溉水源
日本	净化槽技术	基本原理是利用土壤和水田对污水自然净化原理,模仿大自然中物质循环过程中的自净功能,通过对落叶、腐朽废木、木炭、石头等自然材料加工作填料,利用微生物吸附和分解污水中有害物质	主要在排水管网不能覆盖、污水无法纳入集中设施进行统一处理的偏远地区使用。净化槽技术在治理日本的分散型生活污水方面发挥了重要的作用。20世纪60年代,随着社会生活的现代化,人们对抽水马桶的需求增加,净化槽技术开始迅速发展

表2 国外典型农村生活污水处理技术主要特点(续)

Table 2 Main characteristics of rural domestic sewage treatment technology abroad (Continued)

国家	技术名称	原理	应用现状及特点
韩国	湿地污水处理系统	基于“土地-植物系统”的生态作用。韩国利用湿地处理后的污水再浇灌水稻,可取得较理想的净化效果。常用的湿地植物有芦苇、香蒲、灯芯草等,去污能力强,对病原体去除效果好	韩国农村居民居住分散,其生活污水不适合集中处理。而湿地污水处理系统因耗能低,运行成本低,维护费用低等优点,在韩国有较广泛的研究和应用
澳大利亚	FILTER 污水处理系统	一种将过滤、土地处理与暗管排水相结合的污水再生系统,该系统以土地处理为基础,将污水用来灌溉农作物,污水经农作物和土地处理后,再通过暗管排出	该系统既可以满足农作物对水分和养分的需求,同时又能降低污水中污染物的浓度,使其满足排放标准

3 国内农村生活污水处理工艺技术现状

中国农村生活污水治理工作始于20世纪80年代,在不同地区农村生活污水的处理实践中,学者充分调研中国农居特点,分析污染物成分变化,逐渐探索出适

宜中国农村污水治理的工艺技术。目前,国内农村生活污水处理技术主要包括:人工湿地技术、土地渗滤技术、稳定塘技术、生物接触氧化法、膜生物反应器(MBR)技术、活性污泥法及小型一体化污水处理技术^[17]。农村生活污水处理工艺特点及去除效果见表3^[18]。

表3 国内农村生活污水处理技术主要特点

Table 3 Main characteristics of rural sewage treatment technology in China

技术类型	适用条件	人口范围	污染物去除率	吨水投资/元	
				处理规模小于100 m ³ /d	处理规模100~500 m ³ /d
人工湿地处理技术	适用于有闲置土地、洼地、地坑等自然条件,气温适宜的地区	适用于集中式或分散式处理,1~500户	COD:40%~60% BOD:60%~80% TN:30%~40% TP:50%~70%	1500~3000	1300~2800
土地处理技术	适用于有可供利用的、渗透性能良好的砂质土壤或河滩等条件的地区	多适合于分散处理,1~50户	COD:40%~55% BOD:55%~75% TN:40%~50% TP:50%~60%	2200~3300(处理规模小于5 m ³ /d)	2000~2600(处理规模5~10 m ³ /d)
稳定塘技术	适用于有废弃池塘、洼地、沟渠的地区	多适合于分散处理,1~50户	COD:75%~80% BOD:80%~90%	2300~3300(处理规模小于5 m ³ /d)	1900~2400(处理规模5~10 m ³ /d)
生物接触氧化法	适用于对出水水质要求较高的地区	适用于集中式处理≥100户	COD:80%~90% BOD:85%~95% TN:30%~50% TP:20%~40%	4200~5500	4000~5300
膜生物反应器技术	适用于经济较发达、对出水水质要求较高的地区	适用于集中式处理≥100户	COD≤60 mg/L BOD≤20 mg/L TN ≤20 mg/L TP ≤1 mg/L	4200~5500	4000~5300

表3 国内农村生活污水处理技术主要特点(续)

Table 3 Main characteristics of rural sewage treatment technology in China (Continued)

技术类型	适用条件	人口范围	污染物去除率	吨水投资/元	
				处理规模小于 100 m ³ /d	处理规模 100~500 m ³ /d
活性污泥法	适用于经济较发达、对出水水质要求较高的地区	适用于集中式处理≥ 101户	COD≤60 mg/L BOD≤20 mg/L TN ≤20 mg/L TP ≤2 mg/L	3100~4300	2800~3800
小型一体化处理技术	适用于单户或几十户相对集中的地区,其占地面积较小	多适用于分散式处理,1~50户		20000~39000 (处理规模小于5 m ³ /d)	11000~22000 (处理规模5~10 m ³ /d)

对于集中式污水处理,当前中国应用最为广泛的技术是活性污泥法和生物接触氧化法。其中采用活性污泥法的生活污水处理设施接近60%,采用生物接触氧化法的占30%以上^[19]。对于分散式污水处理,全国近一半的设施选用小型人工湿地处理技术,1/4以上设施采用小型一体化污水处理装置^[20],另有少量设施选用稳定塘、土地处理和净化沼气池处理技术。从地域上看,在北京^[21]、深圳^[22]、江苏^[23]、浙江^[24]等经济相对发达地区,农户居住相对较为集中,采用建造集中式污水处理,如地下厌氧处理池及氧化塘-人工湿地高效藻类塘系统等,净化后的水质能达到优于地表水Ⅲ类标准^[25]。在北方大部分地区,由于年平均气温较低,且水资源相对匮乏,但土地面积较大,处理农村生活污水主要是利用地下土壤渗滤的方法^[26],同时对处理水循环利用,不仅能有效去除农村生活污水中的有机物、氮和磷等,而且还能达到节约用水的目的。

4 微生物强化技术在农村污水处理中的应用

4.1 微生物强化技术原理

微生物降解是目前污染物降解的主要驱动力,农村生活污水中污染物大量存在,超过水体自净能力时,微生物降解过程会消耗水体中大量的溶解氧,从而导致水生生物由于缺氧而死亡,水环境容量不断下降,水质随之恶化。随着经济、技术的不断发展,大量的有毒有害污染物被排放到水体中,传统的微生物技术已经不能满足污水处理的需要,为了寻求高效、易操作且便于管理、耐高浓度污染物负荷、不会带来二次污染的污

水处理技术^[27],在20世纪70年代中期,微生物强化技术应运而生,并在之后不断实践改进,被应用到农村生活污水的处理中^[28]。微生物强化技术是利用传统的微生物分离培养法和现代分子生物学技术,从污染水体中筛选优势功能菌群,并运用环境工程学基本原理将已筛选的污水降解菌适当组合,将组合后的微生物复合菌剂重新投加到污染水体中,从而达到强化污水处理系统、降解污染物、净化水质效果的目的^[29]。

4.2 微生物强化技术特点

微生物强化技术首先需要培养、筛选具有高效降解能力的菌种或通过基因工程的手段构建高效菌种;其次构建复合菌剂,确定去污效率最高的最佳浓度配比以及固存方式^[30];最后,将已构建的复合菌剂投至待强化处理的农村生活污水或处理工艺中,以达到强化对污染物的降解效果或增强处理系统在恶劣环境条件下的污染负荷能力,以及系统运行的稳定性^[31]。微生物强化技术主要的特点有^[32]:1) 操作简单、微生物适应环境能力强,能够灵活地应用于不同污染特性的环境中;2) 处理效率高,与传统方法相比效率大大提高,而且反应时间缩短;3) 具有特异性,生物强化技术针对性强,能够有效针对目标物质发生作用,向传统的生物处理系统中引入具有特定功能的微生物,提高有效微生物的浓度,增强对特定难降解污染物的降解能力,提高其降解速率,并改善原有生物处理体系对目标污染物的去除效能。

4.3 微生物强化技术应用手段

4.3.1 培育高效降解菌种技术

微生物强化技术应用于污水处理中,实现培育高效降解菌种的方式主要包括筛选常规功能菌和构建基

因工程菌。筛选功能菌是在长期驯化或受污染环境 中,通过选择性培养基分离具有特定降解性能的微生物,通过富集培养、多次分离纯化得到目的菌株^[33]。构建基因工程菌,也就是运用微生物遗传学的手段去改造微生物特性,使之获得高耐毒性^[34]、高降解活性^[35]、特异或广谱降解污染物^[36]等优良遗传性状,从而创造出新的高效生物处理工艺。利用高效降解基因工程菌生物强化处理难降解污染物,有利于提高污染物降解速率,并对提高处理系统的抗冲击负荷能力具有显著效果。从养殖废水、生活污水、污水处理厂沉淀池活性污泥等环境中培养筛选出具有脱氮除磷、好氧反硝化及其他特异性降解功能性微生物。目前培育高效功能菌株应用在农村生活污水中,主要是针对氮、磷等污染物具有很好的处理效果。如石小彤等^[37]、唐婧等^[38]筛选出既耐盐又具有高效 NO₃-N 去除率的好氧反硝化菌。唐美珍等^[39]从活性污泥底泥中筛选出一株低温菌 *Pseudomonas flava* WD-3,该菌具有高效脱氮除磷和降解有机污染物能力,而且后续研究其应用于污水处理时发现当投加量为 6% 时能得到更好的去污效果。

4.3.2 微生物固定化技术

固定化微生物技术研究始于 20 世纪 50 年代末期,而直到 20 世纪 90 年代,它才成为研究污水处理技术的新热点^[40]。固定化微生物技术是通过物理或化学方法,将游离的微生物固定在一定的空间内,利用微生物的生长、代谢处理污染物质的一种生物强化的方法。根据微生物与载体之间的关系和相互作用分为五大类^[41]:包埋法、吸附法、交联法、共价结合法和复合固定化法。与传统的游离生物处理法相比,固定化微生物技术可以把能降解特定物质的优势菌属或菌群固定在载体上,有效提高微生物的密度,隔离菌体与污染环境的直接接触,缓解环境变化对水处理效果的影响,增大污水处理系统的稳定性和耐受性^[42]。因此,固定化微生物技术是一种产污少、高效低耗、易于运营管理、具有巨大的应用价值和市场化前景的技术^[43],适合在农村地区推广使用。黄韵珠等^[44]在处理畜禽屠宰废水过程中投加固定混合菌,结果出水的各项指标均达到了排放标准,其中 COD_{Cr} 去除率超过 90%,氨氮去除率也在 80% 以上。Shan 等^[45]利用多孔小球固定土壤氮循环细菌,能有效提高氮循环细菌对虾池水体氨氮的去除率。王绍迁等^[46]通过在污染水体中分离光合细菌和微藻,进行固定化后形成菌藻共生体系,用于农业水产养殖废水的

处理,COD_{Cr} 的去除率高达 96%,氨氮和正磷酸盐的完全降解时间也大大缩短。

4.3.3 构建微生物菌剂技术

微生物制剂是指将从自然界中筛选出或人工培育、具有特定降解功能的微生物制成菌液或固体的制剂,以改善环境状况和强化处理系统为目标,菌剂中通常含有处理污染所需要的完整的微生物群落,由自养、异养、兼性菌构成^[47]。向污染水体投加微生物菌剂,能显著缩短微生物降解污染物反应时间,从而提高氮、磷及有机污染物的降解效率。姚力等^[48]通过试验在保留序批式活性污泥(SBR)法的优点的基础上,利用适当载体将好氧反硝化菌固定在一起,即组成序批式固定微生物反应器,从而形成同步硝化-反硝化反应,运行结果表明,无论是降低出水氨氮和 TIN(总无机氮)浓度、还是缩短运行周期上,固定化微生物 SBR 都更有优势。雍家君等^[49]研究表明,向污染湖水中投加反硝化细菌制剂后,水体中 COD 和 TN 的浓度至少减少了 60%,湖水透明度和水质都得到了明显改善。赵昕悦^[50]通过向低温条件下受养殖废水污染的池塘中投加微生物菌剂,使水体中硝化和反硝化细菌大量繁殖,加快了水体中氮循环速率,从而达到水体脱氮的目的。林琳^[51]发现连续投加及间歇投加条件下菌剂组及对照组对 COD 的去除率均高于 90%,氨氮的去除率均高于 95%,而且通过微生物物种变化分析,考察微生物菌剂的污泥减量机理发现,投加菌剂后,系统中物种组成更复杂,物种丰度更高。主要的微生物种群为 Proteobacteria、Bacteroidetes,分别占 50%、30% 左右。熊晖^[52]研究发现投加光合细菌菌剂能明显增加水体微生物种群多样性。从而增强水体自身的抗逆性和自我修复能力。

4.4 微生物强化技术难点与存在问题

微生物强化技术在污水处理方面存在着诸多的优点,但依然不能忽视其可能面临的生态安全风险和技术瓶颈。构建基因工程菌技术研究中主要应用到质粒转移、原生质融合和基因重组三种方法,在实际构建中主要存在以下问题^[53-56]:1) 质粒的排斥性会造成某些质粒无法组合于同一细胞内,活性易被外界环境干扰,生长能力降低;由于质粒所编码的功能并不唯一,因此在质粒转移的同时有可能转移不需要的甚至是有害的性状。2) 难以找到便于检测的遗传标记,融合后染色体的重组是随机的,种属间细胞对异源 DNA 的限制作用和染色体 DNA 的非同源性等障碍。3) 种的壁垒问题,

即有些外源性降解基因在其他微生物中表达时,大多数呈现出活性减弱现象。此外,基因工程菌的有效性也是一个问题,构建的特性能否遗传、降解功能是否长时间稳定都还待解决。

固化微生物技术的运用中,需要大量的载体,且有些载体不能回收利用,固定材料的价格昂贵,导致在技术实施上不利于推广^[57]。固化微生物的稳定性不一,部分菌体容易脱落,影响污水处理的效果。目前,用于水质修复的微生物种类主要是硝化细菌、芽孢杆菌、光合细菌等^[58]。因此,发掘廉价、高效、可回收利用的载体是固定技术研究迫切需要开展的工作。

生物强化技术在从实验室规模到实际工程运用过程中也会遇到一些问题,例如生物强化提升反应器性能的有效时间;接种高效菌种在新生物环境和非生物环境下的行为,对系统的微生物群落组成的影响;基因工程菌逃逸到环境中是否存在造成不可计量的生态风险等。研发应用范围更广、稳定性更高、更智能化的微生物反应器来保证微生物降解污水中污染物反应的高效进行^[59],都是在今后需要进一步研究关注的地方。

5 实例分析——湖北十堰谭家湾生活污水处理

1) 概况。湖北十堰谭家湾,参考《农村生活污水使

用技术指引》及相关规范的要求,从农居特点出发,采取不同的生物强化技术工艺,污水经处理后可用于水作物灌溉,出水执行《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)中水作物灌溉标准, pH: 5.5 ~ 8.5; COD_{cr} ≤ 150 mg/L; BOD₅ ≤ 60 mg/L; SS ≤ 80 mg/L^[60]。

2) 工艺技术。湖北谭家农村湾生活污水主要是洗涤、淋浴和部分卫生洁具排水,日变化系数大,含一定的氮、磷,可生化性强。根据农户居住集中或分散的特点,该村生活污水处理选用了两种工艺模式:一种是生物强化人工湿地工艺;另一种是一体化农村污水处理工艺。

(1) 生物强化人工湿地工艺,流程如图1所示。

工艺流程说明:该工艺主要为居住较为集中的联户污水处理,采用预处理系统+人工湿地(微生物菌剂与湿地植物共生强化)方法。村内的生活污水经收集管网收集后,首先进入格栅池、沉淀池,主要作用是去除污水中大颗粒悬浮物并去除部分有机污染物。水解池内添加产酸菌用于强化有机物的降解,在细菌胞外酶的作用下,悬浮状态或胶体状态的有机物质转化为溶解性有机物,大分子有机物分解为小分子有机物。经水解处理后,污水进入人工湿地,在湿地床内添加脱氮除磷微生物菌剂,主要为强化氮磷消减,出水排入农田灌溉渠,用于农田灌溉。

(2) 一体化农村污水处理工艺,流程图如图2所示。

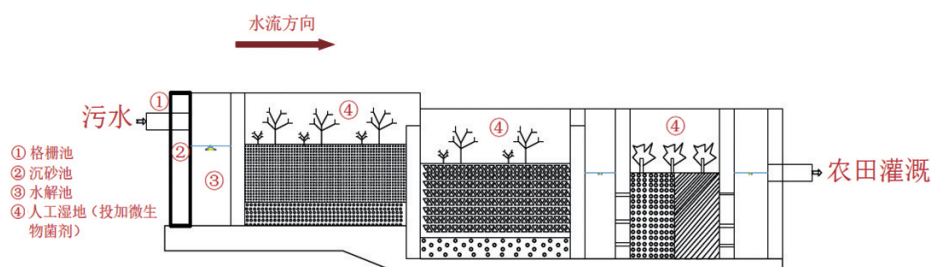


图1 生物强化人工湿地工艺

Fig. 1 Constructed wetland profile

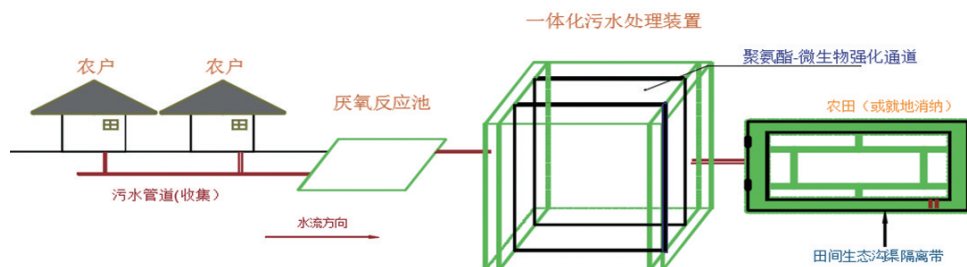


图2 一体化污水处理工艺

Fig. 2 Flow chart of integrated sewage treatment plant

工艺流程说明:该工艺主要为居住较为分散的农户污水处理,农户产生的生活污水经过化粪池厌氧消化后,出水流入一体化污水处理设备,污水经过沉淀过滤后,流经“聚氨酯-微生物强化通道”(聚氨酯包裹固定化微生物小球),可对污水做深度处理,出水安全回灌农田以及其他农业生产活动。

3)生物强化技术工艺效果。该项目自建成投入试运营阶段,出水清澈明亮。工艺一:出水 COD_{Cr} 、 BOD_5 、氨氮、总磷的去除率均超过80%,相比传统人工湿地工艺,出水不仅达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005),而且氮、磷的去除效率提高了将近30%,有机物的降解作用十分明显。工艺二:一体化污水处理设备根据实际可埋于地下也可放置地上,不但节省土地资源,也不受外界环境影响。利用聚氨酯微生物强化技术,可缩短系统反应时间,快速大幅度提高反应速度与效率。利用工艺处理后的污水回灌作物农田,可节水超过40%,并减少10%左右的田间化肥施用量,可实现了“减肥节水”的效果。系统连续运行过程中,无需专业人员的管理。由此可见微生物强化技术可为农村环境治理提供一定的环境效益和经济效益。

6 结论

中国幅员辽阔,地域环境、经济差异较大,需要结合当地情况因地制宜构建农村污水处理体系。微生物强化技术一方面具有投资少、耗能低、效率高、易于操作、无二次污染的特点,能够使系统有机负荷和水力负荷得到有效补偿;另一方面,该技术可缩短污水处理系统发挥去污作用的响应时间,对污染物的转化、降解能力进行增强,使污水的自净能力逐渐得到恢复;再者,该技术有利于保护污水中优势微生物种群结构。微生物强化污水处理技术具备高效性和特效性,可与常规污水处理系统任何阶段进行匹配和无缝衔接,根据实际需求进行选择强化,从而提高排放水质。微生物强化技术的优势特点虽然十分突出,但在实验研究以及实际应用过程中也存在着一些技术难点和问题,比如高效菌剂投加的时效性、生境中种群的多样性、保持微生物联合体的高效性和稳定性、固定化载体的成本问题以及老化失去支撑固定作用、基因工程菌逃逸环境造成的生态风险等。随着现代分子生物学以及材料科学的迅猛发展及广泛应用,研发高效低廉的高分子载

体材料、适应性强可操作性强的生物反应器以及各种安全高效基因工程菌剂将成为微生物强化技术研究的主流方向。

参考文献(References)

- [1] 国家统计局. 中国第二次全国农业普查资料综合提要[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
National Bureau of Statistics. Summary of the second national agricultural census[M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2006.
- [2] 张齐生. 中国农村生活污水处理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2013.
Zhang Qisheng. Rural sewage treatment in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2013.
- [3] 住房与城乡建设部. 2016年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2017-08-18)[2018-06-20]. http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tj-zljxxytjgb/tjxxjtjgb/201708/t20170818_232983.html.
Ministry of Housing and Urban Rural Construction. 2016 year-book of urban and rural construction[EB/OL]. (2017-08-18)[2018-06-20]. http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxxytjgb/tjxxjtjgb/201708/t20170818_232983.html.
- [4] Mahon A M, O'Connell B, Healy M G, et al. Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(2): 810.
- [5] Li K, Xu J, Yun G, et al. Treatment of high salt wastewater by enhanced MBR process with compound salt-tolerant microbial agents[J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2829-2834.
- [6] 朱巨建, 周衍波, 张永利, 等. 壳聚糖的改性及在印染废水处理中的应用[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 112-117.
Zhu Jujian, Zhou Yanbo, Zhang Yongli, et al. Modification of chitosan and its application in the treatment of printing and dyeing wastewater[J]. Journal of Ecological Environment, 2016, 25(1): 112-117.
- [7] 葛扬. 曝气条件下微生物强化砾石河床改善河水水质试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Ge Yang. Experimental study on microbial enhanced gravel bed to improve river water quality under aeration[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [8] 张晓雪. 城乡一体化进程中农村生活污水处理中的公众参与问题与对策[J]. 辽宁农业科学, 2017(4): 54-58
Zhang Xiaoxue. Research on problems and countermeasures of public participation in rural domestic sewage treatment in the process of urban-rural integration[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2017(4): 54-58
- [9] 贾小梅, 彭欣然, 杜静. 我国农村环境保护现状及对策研究[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 42-44.
Jia Xiaomei, Peng Xinran, Du Jing. The present situation of rural environmental protection in china and the countermeasures [J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(5):

- 42-44.
- [10] Grote B. Bioremediation of aquaculture wastewater: Evaluating the prospects of the red alga *Palmaria palmata*, (Rhodophyta) for nitrogen uptake[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28(5): 1-8.
- [11] 夏玉立, 夏训峰, 王丽君, 等. 国外农村生活污水治理经验及对我国的启示[J]. *小城镇建设*, 2016(10): 56-59.
Xia Yuli, Xia Xunfeng, Wang Lijun, et al. Experiences of rural domestic sewage treatment in foreign countries and their enlightenment to China[J]. *Small Town Construction*, 2016 (10): 56-59.
- [12] 严岩, 孙宇飞, 董正举, 等. 美国农村污水管理经验及对我国的启示[J]. *环境保护*, 2008, 1(15): 65-67.
Yan Yan, Sun Yufei, Dong Zhengju, et al. Experience in rural sewage management in the United States and its implications for China[J]. *Environmental Protection*, 2008, 1(15): 65-67.
- [13] 汀洪生. 德国偏远乡村散居居民生活污水处理[J]. *环境导报*, 1998(4): 40-41.
Ting Hongsheng. Domestic sewage treatment of scattered residents in remote rural areas of Germany[J]. *Environment Herald*, 1998(4): 40-41.
- [14] Nie E, Wang D, Yang M, et al. Tower bio-vermifilter system for rural wastewater treatment: Bench-scale, Pilot-scale, and engineering applications[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2015, 12(3): 1053-1064.
- [15] 李卫平, 卢雪枫, 杨文焕, 等. 厌氧/特异性移动床生物膜反应器 (A/SMBBR) 组合工艺处理农药含酚废水[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(3): 1569-1574.
Li Weiping, Lu Xuefeng, Yang Wenhuan, et al. Treatment of pesticides phenol-containing wastewater by anaerobic-specific moving bed biofilm reactor (A/SMBBR) combined process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (3): 1569-1574.
- [16] 赵利. 日本分散型污水处理技术的启示及应用[J]. *现代农业科技*, 2016(5): 219-220.
Zhao L. Enlightenment and application of Japanese decentralized sewage treatment technologies[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(5): 219-220.
- [17] 蒋岚岚, 刘晋, 钱朝阳, 等. MBR/人工湿地工艺处理农村生活污水[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(4): 29-31.
Jiang Lanlan, Liu Jin, Qian Zhaoyang, et al. Treatment of rural domestic sewage by MBR/constructed wetland process[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(4): 29-32.
- [18] 司国良, 周广礼, 胡啸, 等. 村镇污水处理设施运营管理对策的探讨[J]. *中国人口资源与环境*, 2014(增刊2): 240-242.
Si Guoliang, Zhou Guangli, Hu Xiao, et al. Study on the management strategies of sewage treatment facilities in rural areas [J]. *China Population Resources & Environment*, 2014(Suppl 2): 240-242.
- [19] 李红霞, 张建, 杨帅. 河道水体污染治理与修复技术研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2016(4): 74-76.
Li Hongxia, Zhang Jian, Yang Shuai. The technology progress for treatment and repairing of polluted river water[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016(4): 74-76.
- [20] Gu B J, Fan L C, Ying Z C, et al. Socioeconomic constraints on the technological choices in rural sewage treatment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(20): 20360-20367.
- [21] 杨瑞, 李立军. 北方地区农村污水处理技术探索[J]. *山西建筑*, 2017, 43(16): 128-130.
Yang Rui, Li Lijun. Exploration for rural sewage treatment technology in northern China[J]. *Shanxi Architecture*, 2017, 43 (16): 128-130.
- [22] 胡智锋, 叶红玉, 孔令为, 等. 农村生活污水治理设施运营管理对策研究[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(01): 38-40.
Hu Zhifeng, Ye Hongyu, Kong Lingwei, et al. Study on operation and management strategy of rural domestic sewage treatment facilities[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(01): 38-40.
- [23] 周晓莉, 俞锋, 朱光灿, 等. 江苏农村生活污水处理设施进水水质调查分析[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(3): 1445-1449.
Zhou Xiaoli, Yu Feng, Zhu Guangcan, et al. Investigation and analysis of intake water quality of rural domestic sewage treatment facilities in Jiangsu Province[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3): 1445-1449.
- [24] 苏功平, 张小凤, 陈文清. 复合生物滤池+潜流人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(2): 775-780.
Su G, Zhang X, Chen W. Biological filter and subsurface flow constructed wetlands to treat rural domestic sewage[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(2): 775-780.
- [25] Sabeen A H, Noor Z Z, Ngadi N, et al. Quantification of environmental impacts of domestic wastewater treatment using life cycle assessment: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 221-233.
- [26] 骆其金, 陈蕾莹, 林方敏, 等. 农村生活污水处理技术达标能力评估方法及案例研究[J]. *广东化工*, 2018, 45(4): 88-91.
Luo Qijin, Chen Leiying, Lin Fangmin, et al. Assessment method and case study on the ability of rural domestic sewage treatment technology to meet the standards[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(4): 88-91.
- [27] Lu S, Zhang X, Wang J, et al. Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127(127): 325-330.
- [28] Jun M. Hydrogen Production Using Photosynthetic Bacteria[J]. *Microbial Production*, 2014, 263-281.
- [29] 李小宇. 宁夏典型农村生活污水处理系统功能性微生物研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
Li Xiaoyu. Research on functional microorganisms in typical rural domestic sewage treatment system in Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016.
- [30] Wei M, Rakoczy J, Vogt C, et al. Enhancement and monitor-

- ing of pollutant removal in a constructed wetland by microbial electrochemical technology[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 196: 490-499.
- [31] Xu L, Zhao Y Q, Wang T Y, et al. Energy capture and nutrients removal enhancement through a stacked constructed wetland incorporated with microbial fuel cell[J]. *Water Science & Technology*, 2017, 76(1): 28.
- [32] 王海蓉, 曾庆鹏, 王雯婧, 等. 异质异养硝化菌硝化特征与人工强化互补性研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(5): 9-13.
Wang Hairong, Zeng Qingpeng, Wang Wenjing, et al. Study on the nitrification characterization and artificial enhancement complementarity of heterotrophic nitrifying bacteria from different genus[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(5): 9-13.
- [33] Yeh T Y, Wu C H. Pollutant removal within hybrid constructed wetland systems in tropical regions[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 59(2): 233-240.
- [34] 黎凤霞. 生物强化技术在造纸废水处理中运用探究[J]. *环境与发展*, 2018(2): 65-70.
Li Fengxia. Application of bio-enhancement technology in paper making wastewater treatment[J]. *Environment & Development*, 2018(2): 65-70.
- [35] Eo O, Okoh A I. Prevalence and distribution of *Listeria* pathogens in the final effluents of a rural wastewater treatment facility in the Eastern Cape Province of South Africa[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2010, 26(2): 297-307.
- [36] Chen Q F, Yang H Y, Ma J J, et al. The application research progress on the development of artificial plants technology in heavy polluted river[J]. *Advanced Materials Research*, 2013 (726): 1764-1769.
- [37] 石小彤, 李彦芹, 邢国伟, 等. 一株耐盐好氧反硝化细菌的分离筛选及鉴定[J]. *生物技术通报*, 2013(3): 175-180.
Shi Xiaotong, Li Yanqin, Xing Guowei, et al. Isolation, screening and identification of a salt-tolerant aerobic denitrifying bacteria[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2013(3): 175-180.
- [38] 唐婧, 肖亚男, 屈姗姗, 等. 一株耐盐好氧反硝化细菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(12): 5499-5506.
Tang Jing, Xiao Yanan, Qu Shanshan, et al. Isolation and identification of a salt-tolerant aerobic denitrifying bacterium and its denitrification characteristics[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(12): 5499-5506.
- [39] 唐美珍, 李婷婷, 王艳娜, 等. 人工湿地中一株高效低温菌的分离鉴定与去除特性研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(3): 708-714.
Tang Meizhen, Li Tingting, Wang Yanna, et al. Isolation, identification and removal characteristics of a high efficient low temperature bacteria from constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 33(3): 708-714.
- [40] 金军, 刘希. 固定化微生物法处理活性染料印染废水的研究[J]. *安徽农业科学*, 2016(6): 236-237.
Jin Jun, Liu Xi. Study on the treatment of reactive dye printing and dyeing wastewater by immobilized microorganism[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2016(6): 236-237.
- [41] Massalha N, Shaviv A, Sabbah I. Modeling the effect of immobilization of microorganisms on the rate of biodegradation of phenol under inhibitory conditions[J]. *Water Research*, 2010, 44(18): 5252-5259.
- [42] 彭虹. 固定化微生物技术在环境工程中的应用分析[J]. *资源节约与环境*, 2017(11): 63-64.
Peng Hong. Application of immobilized microorganism technology in environmental engineering[J]. *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2017(11): 63-64.
- [43] 赵黔. 循环推流式固定化微生物反应器的设计及优化研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
Zhao Qian. Design and optimization of a circular plug type immobilized microbial reactor[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [44] 黄韵珠, 李扬. 投菌法处理畜禽屠宰废水的试验研究[J]. *甘肃科学学报*, 1997(1): 59-62.
Huang Yunzhu, Li Yang. Experimental study on the treatment of livestock slaughtering wastewater by inoculation[J]. *Gansu Journal of Science*, 1997(1): 59-62.
- [45] Shan H, Obbard J. Ammonia removal from prawn aquaculture water using immobilized nitrifying bacteria[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, 57(5/6): 791-798.
- [46] 王绍迁. 固定化菌、藻体系净化水产养殖废水的研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015.
Wang Shaoqian. Immobilized bacteria and algal system for purifying aquaculture wastewater[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2015.
- [47] Yang L, Ren Y X, Zhao S Q, et al. Isolation and characterization of three heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria from a sequencing batch reactor[J]. *Annals of Microbiology*, 2016, 66(2): 737-747.
- [48] 姚力, 信欣, 周迎芹, 等. 好氧反硝化菌强化序批式活性污泥反应器处理生活污水[J]. *环境污染与防治*, 2014(3): 89-93, 81.
Yao Li, Xinxin, Zhou Yingqin, et al. Sequencing batch reactor enhanced by aerobic denitrifying bacteria for domestic sewage treatment[J]. *Environmental pollution and prevention*, 2014(3): 89-93, 81.
- [49] 雍佳君, 成小英. 蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 2232-2238.
Yong Jiajun, Cheng Xiaoying. Denitrifying complex microflora enrichment and microflora structure in Lihe River sediment [J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (6): 2232-2238.
- [50] 赵昕悦. 复合菌剂的构建及其低温强化人工湿地净化效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Zhao Xinyue. Construction of compound bacterial agent and study on purification efficiency of constructed wetland with low temperature intensification[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2014.

- [51] 林琳. 微生物菌剂对污水处理厂处理效果及微生物群落的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Lin Lin. Effects of microbial agents on treatment efficiency and microbial community in sewage treatment plants[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2015.
- [52] 熊晖. 外加菌剂对养殖水体水质及其微生物群落结构的影响初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
Xiong Hui. Preliminary study on the effect of additional bacterial agents on water quality and microbial community structure of aquaculture water[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [53] Singh J S, Abhilash P C, Singh H B, et al. Genetically engineered bacteria: An emerging tool for environmental remediation and future research perspectives[J]. *Gene*, 2011, 480(1/2): 1–9.
- [54] McClure N C, Fry J C, Weightman A J. Genetic Engineering for Wastewater Treatment[J]. *Water & Environment Journal*, 2010, 5(6): 608–616.
- [55] Gillespie I M M, Philp J C. Bioremediation, an environmental remediation technology for the bioeconomy[J]. *Trends in Biotechnology*, 2013, 31(6): 329–332.
- [56] 陈翠红, 朱琨. 基因工程在降解有机污染物中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2006(2): 29–31.
Chen Cuihong, Zhu Kun. Application of genetic engineering in degradation of organic pollutants[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2006(2): 29–31.
- [57] Rylsky A F, Dombrovskii K O, Krupcey K S, et al. Biological treatment of storm wastewater at industrial enterprise using the immobilized microorganisms and hydrobionts[J]. *Journal of Water Chemistry & Technology*, 2016, 38(4): 232–237.
- [58] 刘元坤, 茆云汉, 王建龙. PVA 固定化微生物方法及应用[J]. 科技导报, 2016, 34(22): 56–61.
Liu Y, Mao Y, Wang J. Methods and application of immobilized microorganism in PVA[J]. *Science & Technology Review*, 2016, (34): 55–61.
- [59] Herrero M, Stuckey D C. Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: A review[J]. *Chemosphere*, 2015 (140): 119–128.
- [60] 国家质量监督检验检疫总局. GB 5084—2005 农田灌溉水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 5084—2005 Water quality standard for farmland irrigation[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.

Research progress of microorganism intensification technology for rural domestic sewage treatment

WU Lingyan, CHEN Peizhen, ZHENG Xiangqun

Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China

Abstract At present, with the variety of China's rural living environment, the lack of environmental awareness for many farmers, and the poor infrastructure, the rural domestic sewage is continuously discharged to aggravate the environmental pollution in rural areas. This paper analyzes the present status of the domestic sewage treatment in rural areas at home and abroad, in the context of the application principles, the characteristics, and the commonly used methods of microbial enhancement technologies, including the high-efficiency degrading technology, the microbial immobilization technology, and the microbial inoculation technologies, which can effectively prevent the sludge from swelling with many advantages, such as the higher treatment efficiency, the resistance to stress, the resistance to toxicity and the impact resistance to load, as compared with the traditional sewage treatment methods. It is shown that the microbial enhancement technology is more suitable in the rural domestic wastewater, for the treatment of domestic sewage.

Keywords rural domestic sewage; wastewater biological treatment; microbiological strengthening technology ●



(编辑 徐丽娇)