

关中农村生活污水减污降碳协同治理技术研究

朱海波¹, 梅凡民², 景振江³

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西安工程大学, 陕西 西安 710048;

3. 陕西碧诺环保科技有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 协同推进农村生活污水减污降碳是当前农村水环境整治的关键。在分析陕西关中地区农村污水排放特征的基础上, 结合关中渭北旱塬、中部平原、秦岭北麓浅山区农村空间布局、经济发展和生态环境实际状况, 分别提出了适宜的污水绿色低碳收集、处理与利用技术, 以期为关中整县推进农村污水治理, 建设美丽乡村提供参考和技术支撑。

关键词: 减污降碳; 农村生活污水; 美丽乡村; 关中地区

中图分类号: X799.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0488-5368(2025)03-0082-05

Cooperative Treatment Technology of Pollution and Carbon Reduction of Rural Domestic Sewage in Guanzhong Region

ZHU Haibo¹, MEI Fanmin², JING Zhenjing³

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Binuo Environmental Protection Technology Co., Ltd, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The coordinated reduction of pollution and carbon emissions in rural domestic sewage is a key aspect of improving the rural water environment. This study examines the characteristics of rural sewage discharge in the Guanzhong region of Shaanxi. Based on the spatial distribution, economic conditions, and ecological environment of different rural areas—including the Weibei dryland plateau, the central plain, and the shallow mountain areas at the northern foot of the Qinling Mountains—this study suggests green and low-carbon methods for sewage collection, treatment, and reuse. These methods aim to support large-scale rural sewage treatment and help build a cleaner and more beautiful countryside in the Guanzhong region.

Key words: Pollution and carbon reduction; Rural domestic sewage; Beautiful countryside; Guanzhong region

2024年1月,《中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》^[1]指出,要扎实推进农村厕所革命,有效治理农村生活污水、垃圾和黑臭水体,建设美丽乡村。陕西关中地区的行政村数量占到全省的42.3%,人口占到全省农村人口的58.4%^[2]。近年来,随着关中人居环境整治和乡村生态振兴工作的扎实开展,污水治理率达到32%,农村水环境质量持续改善^[3]。2022年5月,《陕西省农业农村污染治理攻坚战实施方案(2021-2025年)的通知》^[3]指出,到2025年全省农村生活污水

治理率达到40%,富平、三原、泾阳等10县实施农村生活污水治理“整县推进”试点,行政村污水治理率达到90%。污水处理过程能耗高、碳排放量大,总用电量占全社会用电量的0.36%,碳排放量占全社会碳排放量的2%,是十大碳排放行业之一^[4]。污水处理行业已被列为减排和实现“碳中和”的优先行业。据测算,乡村污水处理系统的碳排放将会成为污水处理系统碳排放的增长极^[5]。在碳达峰、碳中和、美丽乡村建设的双重背景下,协同推进农村污水减污降碳迫在眉睫^[6]。基于此,在分析污

收稿日期:2024-03-19 修回日期:2024-05-24

基金项目:杨凌职业技术学院科学研究基金项目(GZ2023-006);杨凌示范区科技计划项目(2018SF-07)。

第一作者简介:朱海波(1981-),男,副教授,研究方向为水环境保护与修复。

水排放特征的基础上,提出了关中农村生活污水源头资源化分离、减污降碳协同处理技术,以期为关中县市全面推进农村污水绿色低碳治理,建设美丽乡村提供技术支撑。

1 关中农村污水排放特征

1.1 关中地区概况

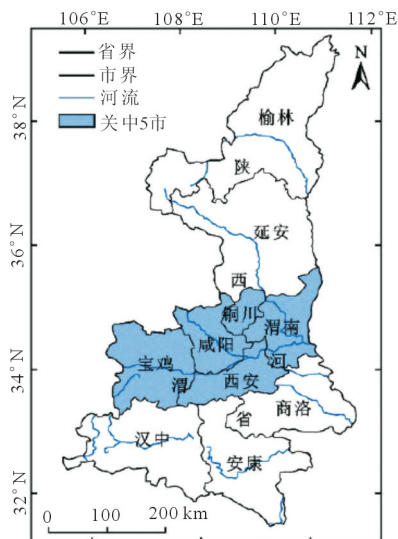


图1 陕西省关中地区地理位置

关中地区位于陕西省中部,包括西安市、宝鸡

市、咸阳市、铜川市和渭南市,面积约 5.56×10^4 km^2 ,地理位置如图1所示。关中北侧是渭北山系,地貌以黄土丘陵和冲击平原为主;南侧紧接秦巴山脉,地貌以沿山丘陵为主;中部是平原,地势平坦开阔。关中地区地处黄河流域下游,渭河水系及其支流横贯东西,属暖温带半湿润半干旱季风气候,年平均温度 $9 \sim 13^\circ\text{C}$,年均降雨量 $500 \sim 800$ mm,多集中在7~9月。

1.2 农村污水排放特征

农村生活污水主要来源于做饭、洗漱、洗衣、冲澡和冲厕。据调查,关中村民家中95%以上有洗涤盆、洗衣机,90%以上有洗浴间,50%以上有室内卫生间,无害化厕所覆盖率达到80%以上。做饭、洗漱、洗衣过程排放的污水浓度低,称为灰水;厕所的粪尿污水浓度较高,称为黑水。城中村或近郊村庄黑水灰水混合排放,离城较远村庄黑水、灰水分开排放。由于学生上学、成人打工的作息时间安排,污水排放集中在早中晚三餐。污水量是其它时段的2~3倍,日变化系数1.5~2.5。污水排放量一般为 $50 \sim 80 \text{L}/\text{人}/\text{d}$,单村排放量在 $20 \sim 300 \text{m}^3/\text{d}$ ^[3],渭北旱塬、秦岭浅山相对中部平原区农村排放量较少。污水成分简单,主要是泥砂、有机物、氮磷,基本不含重金属和有毒有害物质。关中农村生活污水水质与排放标准如表1所示。

表1 关中农村生活污水水质与排放标准^[7-8]

(mg/L)

项目	COD	BOD5	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	SS
平均浓度	171.70	69.77	28.26	32.63	3.49	208.74
特别排放限值	60	-	15	20	2	20
一级排放标准	80	-	15	-	2	20
二级排放标准	150	-	-	-	3	30

2 污水源分离与资源化

2.1 灰黑水分离

生活污水一般分为两类,一类是做饭、洗衣和洗漱等产生的灰水;一类是粪便、尿液和冲厕水的混合物,黑灰水的水质特征见表2。虽然黑水水量只占到生活污水总量的5%,但是黑水污染物浓度大,化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)分别达到污水总量的61%、85%、86%^[9]。将黑水、灰水从源头分离,单独收集分质处理,一方面可以实现黑水的资源化;另一方面N、P浓度降低,使得灰水处理工艺可适度简化,降低药耗能耗,减少碳排放。

2.2 粪尿分离

将黑水中的尿液与粪便进一步分离收集,可进一步降低黑水污染物浓度。当尿液分离率达到65%时,污水中的氮、磷负荷可分别降低55%和33%;当尿液分离率达到100%时,出水中的氮浓度可降低80%~85%,磷浓度可降低50%^[10]。

粪尿进一步分离,还会产生可观的碳补偿。尿液贮存后的土地利用减少了氮肥和磷肥的施用,粪便厌氧发酵产生的甲烷用于发电实现碳补偿。曹睿等^[11]研究表明,单户、联户和纳管灰黑水混合收集方案的净碳排放量(以CO₂计)分别为 $1.21 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $3.37 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $2.69 \text{ kg}/\text{m}^3$,单户、联户和纳管源分

离方案的净碳排放量(以 CO_2 计)分别为 0.50 kg/m³、0.04 kg/m³ 和 0.54 kg/m³,均实现了零碳排放甚至是负碳排放。

表 2 黑水和灰水的水质特征^[9]

(mg/L)

项目	COD	NH_4^+-N	TN	TP
黑水浓度	1 203.0~1 711.0	73.4~172.6	214.6~608.0	18.8~39.6
灰水浓度	497.0~584.0	3.9~7.3	18.0~26.0	2.1~2.7

2.3 黑水的资源化利用

目前,关中地区农村改厕率达到 70%左右,计划在 2025 年末达到 85%^[3]。农村改厕,不但提升了农村人居环境质量,而且实现了污染源头分离。农村厕所的主要类型有三格式化粪池、双瓮漏斗化粪池和完整上下水道水冲式厕所。在关中地区,对于经济条件较好且具备完整上下水条件的近郊村庄,可选用水冲式厕所,其他区域选用三格式化粪池。

三格化粪池先通过沉淀、过滤作用去除大部分非溶解态污染物,再经过微生物厌氧发酵作用降解部分溶解态污染物,实现粪污无害化,保留氮磷,处理后的粪污还田利用。三格化粪池 3 格之间的比例为 2:1:3,结构简单、造价低廉且无动力消耗,是一种资源型卫生厕所。粪渣堆肥后的有机肥可用于苹果、猕猴桃、设施蔬菜生产。有机肥的施用,可降低农田碳排放。王晓娇等^[12]研究表明,相对于单施无机肥,有机无机配施用能显著提高 0~5 cm 土层易氧化有机碳、微生物量碳氮、蔗糖酶活性,0~30 cm 土壤碳库管理指数提高 127.41%,有机肥施用使旱地农田碳排放效率显著降低 41.10%。有机肥作的施用,为土壤微生物的活动提供了碳源,提高了土壤微生物的活性,促进了土壤中的氨氧化过程,降低了土壤 NH_4^+-N 的含量,从而增加了 CH_4 的吸收通量;有机肥分解慢,而土壤微生物在参与养分矿质化的过程中会固定土壤的氮素,从而降低了土壤微生物可直接利用的无机氮含量,降低 N_2O 排放^[13]。

3 污水减污降碳协同处理

污水处理过程的碳排放量占全社会碳排放量的 2%,是十大碳排放行业之一。泵、鼓风机、药剂等设备与材料的使用会产生间接碳排放,污水中有机物和氨氮的生物降解会产生直接碳排放。间接碳排放占总碳排放的 80%,其中电力、药剂的排放分别占到 43.2%和 33.3%^[14]。在碳中和、碳达峰的背景下,关中农村污水应选择绿色低碳处理技

术,以减少电能、药剂消耗,降低碳排放,实现污水的减污降碳协同处理。

3.1 一体化智能设备

一体化农村生活污水处理设备是将调节、生物净化、沉淀等处理单元,机电设备,控制设备,管道系统等集成在一定空间结构内的成套污水处理装置。生物处理单元主要选用厌氧/缺氧/好氧(A^2O)、多级缺氧/好氧(AO)、生物接触氧化、膜生物反应器(MBR)等工艺方法。设备外壳一般选择碳钢、玻璃钢等材质,内外作防腐处理。由于一体化设备高度集成、模块可移、即建即用,所以非常适合于居住集中、环境要求高的农村地区的污水处理。

关中平原的陈仓、武功、临潼等县区农村居住集中,小村有 100 户,大村达到 1 000 户,污水排放量在 20~300 m³/d,灰水可以选用 1 组或多组一体化污水处理设备。渭北旱塬的旬邑、耀州、洛川,秦岭北麓浅山的蓝田、长安、周至等居住较为集中的村庄也可选用一体化污水处理设备。当出水要求达到一、二级排放标准时,可选择 A_0^2 、多级 AO、移动床生物膜反应器(MBBR)工艺;当出水要求达到特别限值,排入水源保护地周边水系时,可选用 A^2/O -MBBR、MBR 工艺。陕西蔚蓝科技公司的“中大”一体化 MBR 处理设备集成活性污泥和超滤膜技术,脱氮除磷效果好,无需沉淀、砂滤环节,在西安长安区、延安市洛川县等农村污水治理中得到广泛应用,当进水 $\text{COD}_{\text{cr}}=120\sim 350\text{ mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5\leq 180\text{ mg/L}$ 、 $\text{TN}\leq 40\text{ mg/L}$ 、 $\text{TP}\leq 4.0\text{ mg/L}$,出水 $\text{COD}_{\text{cr}}\leq 50\text{ mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5\leq 10\text{ mg/L}$ 、 $\text{TN}\leq 15\text{ mg/L}$ 、 $\text{TP}\leq 0.5\text{ mg/L}$,出水优于一级 A,达到特别限值标准。对于经营农家乐的村庄,需在处理工艺的前段增添隔油池。

基于设备集成和生物处理要求,一体化处理设备需安装泵、风机等装置。由于机电装置耗电,一方面直接增加设备运行成本;另一方面间接增加碳排放,所以节能减碳是一体化污水处理设备持续推广应用的关键。孟凡坤^[15]研发了日处理 100 L 的

光伏驱动农村生活污水一体化处理设备,在去除污染物的同时,每年可减少碳排放 12 632.93 kg。钱明等^[16]在农村污水处理站安装在线氧化还原电位(ORP)检测仪、网络电表、变频调节器和可编程逻辑控制器(PLC),通过耦合水质氧化还原电位、水量和风机功率等参数实现对处理设施的运行评估和动态调控,达到提高处理效率,降低能耗、碳排放的目的。1 a 的测试中,13 座污水站能耗可下降 25.5%~43.4%,而检测仪和控制器的成本不超过 1 万元。随着智能感知、自主控制和多目标动态优化等^[17]人工智能技术的快速发展,以“互联网+”为基础建立的智慧农村污水管理平台可以进一步实现一体化农村污水处理设备的远程精确控制和及时故障响应,提升污水处理效果,降低能耗、碳排放。

3.2 土壤渗滤

土壤渗滤是一种污水土地处理技术,利用土壤过滤、植物吸收和生物降解等作用净化污水。土壤渗滤系统占地面积小,建设成本低,处理效果较好,COD、TN、TP 的去除率一般可达到 70%、50%、60%左右,出水可用于农作物、蔬菜和林木灌溉,实现水资源循环利用^[18]。王淞民等^[19]在农村庭院外建造三格化粪池+渗滤沟式土壤渗滤系统,同时在土壤渗滤系统上方建造菜园,研究表明,土壤渗滤系统不但显著提高菜地土壤 TN、TP 含量,而且还促进了土壤细菌群落多样性和丰富度,菜地土壤卫生学指标也均达到无害化要求,蔬菜食用安全。虽然土壤渗滤系统去除有机物、氮的过程会产生 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体,但相比常规污水处理系统,土壤渗滤系统的能耗小,间接碳排放低,加之其上种植的植物有碳汇作用,总体来说,土壤渗滤系统是一种绿色低碳的污水处理技术。

麟游、旬邑、洛川等渭北旱塬区,灞桥、蓝田、华州等秦岭北麓浅山农村多单户或 10~50 户村民居住在一起,居住分散。当农户家中改厕后,黑水通过化粪池收集处理,余下的洗衣、做饭、洗漱灰水流量小、浓度低,可选用土壤渗滤系统处理。土壤渗滤系统可建在农户院中、门前或街道空地上。灰水通过管渠收集后先流经人工栅网,再流入沉淀池,最后流入土壤渗滤系统。栅网、沉淀池可有效拦截灰水中的菜叶、泥砂、饭粒等杂物,减少土壤渗滤系统堵塞几率。在土壤渗滤系统中,灰水先通过穿孔管布水后流经配水层,均匀配水和进一步拦截大粒径杂质,然后再到达土壤渗滤层,经土壤吸附、微生物降解净化。配水管选用 32 mm 的 PE 管,孔之间

的距离为 100 mm,孔径为 5 mm。配水层填料选用沸石、陶粒、砾石等,深约 300 mm。土壤就地取用,深约 1 000 mm 左右。填料上方覆盖约 300 mm 的土壤,可种植蔬菜、瓜果、花卉,打造家庭小花园。农户灰水排放的时间周期性变化,使得土壤渗滤系统常处于干湿交替运行状态,可以改善系统好氧-厌氧环境,强化处理效果,减少温室气体排放,同时可以缓解悬浮物沉积、有机物生长而造成的系统堵塞,保持系统土壤渗透性,延长系统使用时限。冬季时,可用玉米秸秆或塑料薄膜覆盖在土壤渗滤系统表面,起到保温作用,待春季温度回升后,清理玉米秸秆或塑料薄膜。

3.3 人工湿地

人工湿地是一种近自然的污水生态处理技术,利用基质、微生物和植物的沉淀、吸附与生化作用净化污染物^[20]。由于人工湿地工艺简单、操作方便、运行成本低、景观价值高,在污水厂尾水、河湖微污染水、农村生活污水治理中得到广泛应用。

人工湿地中有机物的氧化,植物、微生物的呼吸产生 CO₂,有机物的厌氧分解产生 CH₄,N₂O 是则废水中含氮物质不完全硝化和反硝化的产物。虽然人工湿地运行中会释放 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体,但是由于湿地植物的光合作用会固定大气中的 CO₂,所以人工湿地总体表现为碳汇^[21]。Hu 等^[22]对人工湿地长达 50 个月的监测后发现,人工湿地不仅有效实现了农村生活污水的治理,而且实现了碳汇,每年的增温潜势为 -8.72 kg CO₂-eq/m²。相对于活性污泥、生物膜等传统污水处理技术,人工湿地的碳排放可减少 50%^[21]。

关中中部的陈仓、杨凌、临潼、富平等县区集中居住农村,渭北和秦岭北麓浅山区的凤翔、周至、华州等县区分散居住农村的生活污水处理选用“预处理+人工湿地”工艺,进水 COD_{cr} = 100~400 mg/L、NH₄⁺-N = 30~50 mg/L、TP = 1~6 mg/L mg/L,出水 COD_{cr} ≤ 80 mg/L、NH₄⁺-N ≤ 15 mg/L、TP ≤ 2 mg/L。预处理主要去除进水中泥砂、纸屑、碎叶等,以减少渠道、湿地的堵塞。堵塞会降低湿地复氧能力,内部形成更强的厌氧环境,增加了 CH₄ 和 N₂O 的排放,也阻碍了 CH₄ 向 CO₂ 的转化,CH₄、N₂O 增温潜势分别是 CO₂ 的 25、296 倍^[23],所以预处理是非常重要的。常用的预处理有格栅、沉砂、厌氧水解等单元。对于 10~20 户的村组,预处理只需在每家污水的出户管端设置筛网、沉泥井,从源头减少渣物。为防止油脂的堵塞,经营农家乐的村组、农户应再增添隔油池。

若将 CH_4 和 N_2O 折算成 CO_2 当量后,水平潜流、表面流和垂直流湿地释放通量分别是 $358 \text{ mg-CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 257 、 $162 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ [23],可见垂直流湿地温室气体的释放通量最小,这主要源于垂直流的复氧速率较高。由于组合湿地可以提供良好的氧气输送,提升微生物的丰度,增强微生物的活性,所以还会进一步减少温室气体的排放。结合不同湿地污染物减排效果、碳排放大小,以及区域环境、社会发展特征,关中中部农村选用垂直潜流+水平潜流工艺,渭北村组选用垂直潜流+表流工艺,秦岭浅山村组选用二级垂直潜流工艺。

基质不但支撑湿地植物的生长,也是微生物生长的场所。基质的理化性质影响湿地内部的微环境和生化条件,进而影响温室气体的排放。考虑植物生长、 O_2 (氧气)的传输,基质选用砾石、碎石、沸石等。当需要提升脱氮效果,出水排入环境敏感区域时,可增加钢渣、炉渣等功能性基质。减少温室气体排放,可选用铁锰基填料。铁锰基填料上铁锰氧化物通过竞争有机物,并通过提供电子受体促进甲烷厌氧氧化作用,减少 CH_4 排放量 [24]。为减少堵塞,水平潜流人工湿地主体段基质的粒径为 $10 \sim 50 \text{ mm}$,垂直潜流的为 $10 \sim 50 \text{ mm}$,表层可以不覆盖黏土,植物直接生长在砂、砾石上。

植物是人工湿地生态净化的关键,通过吸收、降解、转化、储存等作用去除水中污染物。不同植物净化污染物的同时所排放的温室气体是有所差异的,例如,莎草比芦苇的 CH_4 释放量要高出 $20\% \sim 51\%$,美人蕉的 CH_4 和 N_2O 的释放量小于芦苇和风车草,其全球增温潜势最低,这可能源于美人蕉根部具有相对较强的泌氧能力,能将更多的 CH_4 氧化,也促进完全反硝化,减少 N_2O 排放,是优良的碳汇植物 [25]。结合关中乡村气候、景观等因素,关中人工湿地植物选用美人蕉、芦苇、菖蒲、黑麦草等植物。

4 结语

在“美丽中国”和“碳中和”的新时代背景下,要协同推进污水收集、处理全过程的污染物消减和温室气体减排,实现减污降碳协同增效。农村污水具有排放分散、水量间断、水质波动等特点,所以因地制宜,科学合理的绿色低碳收集和治理技术是实现农村污水减污降碳增效的关键。综合考虑陕西关中农村空间布局、经济发展、生态环境状况,渭北塬区农村污水优先选用单户或单村收集模式,土壤渗滤、人工湿地处理技术;中部平原区优先选用集

中纳管、单村或联村收集模式,一体化设备、人工湿地处理技术;南部的秦岭北麓浅山区优选单户或单村收集模式,土壤渗滤、一体化设备处理。铁锰新填料、碳汇新植物、人工智能新技术的应用会进一步提升农村污水处理效果,减少碳排放。

参 考 文 献:

- [1] 中共中央、国务院. 关于全面推进美丽中国建设的意见[EB/OL]. [2024-1-11]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11126/202401/content_6928805.html.
- [2] 陕西统计局. 陕西统计年鉴(2023)[EB/OL]. [2023-10-24]. <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/sx-tjnj/index.html>.
- [3] 陕西省生态环境厅、陕西省农业农村厅、陕西省住房和城乡建设厅、陕西省水利厅、陕西省乡村振兴局. 关于印发陕西省农业农村污染治理攻坚战实施方案(2021-2025年)[EB/OL]. [2022-5-5]. http://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/zcwjk/szfbm_14999/qtwj_15009/202208/t20220814_2245702.html.
- [4] Chunhui Zhang, Guifeng Zhao, Yanan Jiao, et al. Critical analysis on the transformation and upgrading strategy of Chinese municipal wastewater treatment plants: Towards sustainable water remediation and zero carbon [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 896 (20):1-16.
- [5] 付浩,罗琦. 提质增效行动下某设区市污水处理减碳强度分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(23):63-68.
- [6] X. Liang, X. Yue. Challenges facing the management of wastewater treatment systems in Chinese rural [J]. *Water Science & Technology*, 2021, 84(6):1518-1526.
- [7] Rong. Y., Tang. H., Zhang, Y. et al. Study on sewage characteristics in rural China and pollutants removal performance of biologically enhanced internal circulation treatment system [J]. *Sci Rep*, 2023(18):18058.
- [8] 陕西生态环境厅. 陕西农村生活污水处理设施水污染物排放标准:DB61/1227-2018[S].
- [9] 程方奎,汪晨晨,温仓祥,等. 太湖流域农村生活污水产污特征及治理模式分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(3):578-585.
- [10] 张奇誉,刘来胜. 农村分散式生活污水源分离技术现状与发展趋势分析[J]. *中国农村水利水电*, 2020(8):20-24.
- [11] 曹睿,封莉,杜子文,等. 农村生活污水传统处理与源分离处理碳排放比较[J/OL]. *环境科学*, 2024.
- [12] 王晓娇,蔡立群,齐鹏,等. 培肥措施对旱地农田土壤 CO_2 排放和碳库管理指数的影响[J]. *草业学报*, 2021, 30(2):32-45.

(下转第 104 页).