

鄂西山区农村生活污水处理及排放状况调查研究

王 煜¹, 郑 伟¹, 卢晓春¹, 李 宁¹, 杨 超²

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 宜昌市水利水电勘察设计院有限公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要:以鄂西山区某饮用水源水库周边农村福善场村为例,通过现场调查分析和水质检测对鄂西山区农村生活污水处理及排放状况进行了调查研究。结果表明:鄂西山区农村生活污水主要通过集中微动力污水处理站、三户联排小型微动力污水处理设施和三格式化粪池3种方式处理后排入地表沟渠、堰塘或下渗至地下;经3种污水处理方式处理后的出水水质均未达到农村生活污水排放水质要求,对邻近饮用水源水库水质具有一定影响;农村微动力污水处理设施存在运行成本高、运维程序复杂、疏于管理、有效运行时间短等问题,致使其难以达到相应的污水处理效果;根据当地农村地势及生活污水排放特点研究新型农村生活污水处理方式是保障鄂西山区农村水环境安全与质量的当务之急。

关键词:农村生活污水;饮用水源水库;现场调查;水质检测;鄂西山区

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0058-05

Investigation on rural domestic sewage treatment and discharge conditions in montane of western Hubei//WANG Yu¹, ZHENG Wei¹, LU Xiaochun¹, LI Ning¹, YANG Chao² (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Yichang Water Conservancy and Hydropower Design Institute Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: Taking the rural Fushanchang village around a drinking headwater reservoir in western Hubei montane as a research example, an investigation was carried out on the current situation of rural domestic sewage discharge and treatment in western Hubei montane through on-site investigation and water quality testing. The results show that rural wastewater in western Hubei montane is mainly treated by three methods, including centralized micro-powered station, small micro-powered facility for three-household combined discharge, and three-format fermenting tanks. After treatment, the sewage is discharged into surface ditches, weirs and ponds or infiltrated into the ground. The test results of the effluent water quality of the three wastewater treatment methods cannot meet the requirements of rural domestic wastewater discharge water quality, and it has a certain impact on the water quality of the adjacent water source reservoir. The micro-powered sewage treatment facilities have high operating costs, complex operation and maintenance procedures, negligent management and short effective operation time, making it difficult to achieve the appropriate sewage treatment effect. Therefore, the study of new rural domestic wastewater treatment methods based on the characteristics of rural terrain and domestic wastewater discharge in western Hubei montane is imperative to ensure the safety and quality of the rural water environment.

Key words: rural domestic sewage; drinking water reservoir; site investigation; water quality analysis; western Hubei montane

鄂西山区位于我国地形台阶第二级阶梯的东部边缘,区域内山脉总体呈 NE-SW 走向,平原、丘陵、山地所占比例分别为 10%、21% 和 69%,形成了“一平二丘七山”的独特地形结构^[1],构造了鄂西山区复杂的地形地貌^[2]。

由于特殊的地理位置和气候条件,鄂西山区农村一直处于缓慢发展状态,村庄较为分散,基础设施

落后,经济条件差。自 2017 年以来,随着乡村振兴战略的提出与实施,农村的经济发展和生活水平有所提高^[3-4],随着经济的快速发展,鄂西山区农村生活污水的排放量和污染负荷呈不断上升趋势^[5-6],特别是邻近饮用水源水库的农村地区,农村生活污水通过地表径流、土壤渗透等方式进入水库,污染水库水体,给人们的饮水安全和身体健康造成巨大威胁^[7-8]。

基金项目:湖北省水利重点科研项目(1321244)
作者简介:王煜(1976—),女,教授,博士,主要从事水电站生态运行及河流水生态环境研究。E-mail:wangyuhoney@163.com
通信作者:杨超(1982—)男,高级工程师,博士,主要从事水动力学研究。E-mail:yangchao@126.com

为详细了解农村生活污水排放情况和治理现状,合理制定农村生活污水的处理措施及方案,提升农村生活污水治理效果,本文对鄂西山区典型农村福善场村的生活污水处理和排放现状进行调查研

1 研究区概况

鄂西山区属山地丘陵地带,山区村落分布较为分散,村内农户以散居为主,房屋多依山而建。受地理及气候条件影响,鄂西山区内水系丰富且相互连通,村民日常的生活污水及农田面源污水通过地势落差汇入下游水体,未经处理或未达标排放的农村生活污水汇入水系,可能造成水生态环境发生严重恶化。位于鄂西地区中部的福善场村是一座典型的山区村落,村内地势高差大,农户房屋多依傍山体而建,该村行政区域面积约 7.5 km²,总耕地面积 71 hm²,山脚处紧邻一座饮用水源水库(图 1)。福善场村下辖 9 个村民小组,共有散居农户 323 户 1 088 人,其中 33 户集中居住在村委会附近较为平坦的地带,其余农户均散居至距水库库岸 500 m 范围内,其中 136 户位于水库外围 100 m 范围内,该村农户生活污水主要为日常生活、盥洗、养殖排放污水,水体具有典型的农村生活污水特征。因此,以福善场村为例,探究村内的污水排放和治理情况,以及对于邻近水库水质的影响。

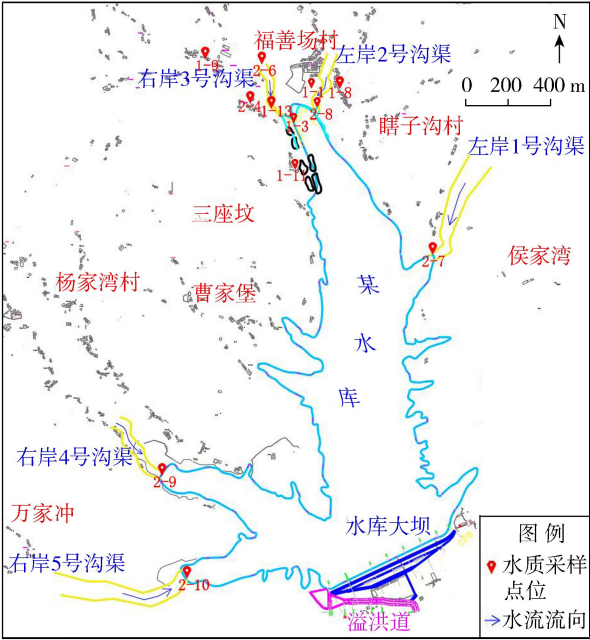


图1 水库入流及水库周边农村位置分布

该水库隶属长江水系,是一座以城市供水为主,

灌溉为辅,兼顾防洪等综合利用的中型水库枢纽工程^[9],作为饮用水源水库,其流入、流出水质均应满足地表水Ⅱ、Ⅲ类水质要求。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和 DB 42/1537—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》联合要求,当处理设施位于地表水Ⅱ、Ⅲ类功能的湖泊保护区外围 500 m 范围内,不区分规模和出水排放去向,水污染物排放应执行 DB 42/1537—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》中所要求的一级标准。

2 农村生活污水排放标准及水质检测方法

按照 DB 42/1537—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》中一级标准对调查区域水样各项指标进行化验分析,每个采样点水样做两次平行检测并取其平均值。标准限制包括水污染物排放基本控制项目 pH 值、悬浮物(SS)、化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮(NH₃-N)和选择控制项目总氮(TN)、总磷(TP)、动植物油。详细检测指标和检测方法见表 1。

表1 水质检测指标和检测方法

检测指标	检测方法	仪器型号
溶解氧(DO)	溶氧仪检测	HQ 系列便携式测定仪
pH 值	玻璃电极法	UB-7 型 pH 计
浊度	浊度仪法	WGZ-200A 浊度仪
电导率	电导率仪法	DDSJ-308A 电导率仪
SS	重量法	AP-01P 抽滤机、ML104/02 天平
NH ₃ -N	纳氏试剂分光光度法	UV2601 分光光度计
TP	钼酸铵分光光度法	UV2601 分光光度计、SX-700 总磷灭菌锅
COD _{Cr}	快速消解分光光度法	UV2601 分光光度计、DRB-200 消解仪
粪大肠菌群	滤膜法	HS1300 洁净工作台、QHX-250BSH-Ⅲ恒温箱

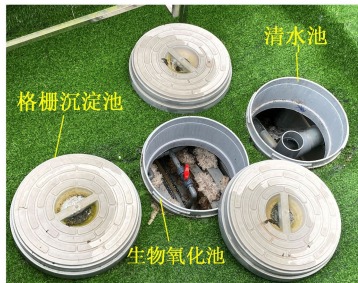
3 福善场村生活污水处理及排放状况

3.1 生活污水处理方式及效果

福善场村目前对农户生活污水采用 3 种处理方式:住房集中、地势平坦的 33 户采用集中式微动力污水处理站(图 2(a));邻水库分散住户(距离水库库岸 100 m 以内)采用三户联排小型微动力污水处理设施(图 2(b));其他分散住户采用单户三格式化粪池(图 2(c))。其中微动力污水处理设施利用 A/O 生物接触氧化法为处理工艺^[10],其工艺流程为格栅沉淀池→生物氧化池→清水池,污水经格栅沉淀池沉降固体颗粒杂质和拦截悬浮污物后利用水泵将池内上层澄清液提升至生物氧化池内,生物氧化池利用内部填充的多孔球型悬浮滤料截留悬浮固体杂质,同时利用滤料表面附着的微生物黏膜对污水



(a) 集中式微动力污水处理站



(b) 三户联排小型微动力污水处理设施



(c) 单户三格式化粪池

图2 福善场村现有农户生活污水处理措施

中的有机污染物做进一步吸附降解处理。三格式化粪池利用厌氧发酵、中层过粪和寄生虫卵沉淀的原理^[11],其工艺流程为沉淀发酵池→再发酵池→粪肥存储池,粪便在沉淀发酵池(第一池)内沉积发酵分解,初分解的上层肥料液体流入再发酵池内(第二池)继续发酵、分解使其进一步无害,该过程寄生虫卵继续下沉,最后再发酵池内上层肥料液体流入粪肥存储池(第三池),以达到沉淀或灭杀粪便中寄生虫卵、肠道致病菌的目的。

为分析3种污水处理方式的处理效果,分别针

对集中微动力污水处理站(图1的采样点1-1),三户联排小型微动力污水处理设施(图1的采样点1-8、1-11和2-4)和单户三格式化粪池(图1的采样点1-9)进行进、出水水质检测。结果得出:3种不同污水处理设施的出水水质指标均存在不同程度的超标现象(表2),集中式微动力处理站出水水质相对最优,除 COD_{Cr} 略高于标准排放值外,其他均在标准限值内;三户联排小型微动力污水处理设施出水水质较差,出水 DO 浓度增大,浊度、电导率、粪大肠菌群数虽均有一定程度下降,但出水 TP 、 COD_{Cr} 均超标,两处采样点(1-11和2-4)出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标,甚至存在出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 、 COD_{Cr} 指标高于进水指标的现象;单户三格式化粪池污水处理设施出水水质最差,出水中 SS 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 、 COD_{Cr} 等指标均超出标准限值2倍以上,分别为标准排放值的2.28倍、3.67倍、10.46倍和3.95倍。

现场调查得知上述污水处理设施净水效果不佳是因为设备运行费用及运维操作不当等问题导致。微动力污水处理设施内的耗电装置为提升水泵,提升水泵的作用是将格栅沉淀池内污水抽至生物氧化池并维持其正常工作水位,水泵的正常运行耗电量约为 $10\text{ kW}\cdot\text{h/d}$ 。但运行期间因耗电费用问题致使提升水泵和液位电控装置常处关闭状态,水泵无法正常工作,仅依靠污水在格栅沉淀池顶部溢流进入生物氧化池。污水自流导致在污水排放高峰期格栅沉淀池和生物氧化池有污水满溢现象发生;污水排放低谷期又因格栅沉淀池的供水不及时导致生物氧化池出现干涸状态,由此造成生物氧化池内滤料表面生物膜常处于干湿交替的状态,严重影响膜上微生物活性及生物膜稳定性,进而影响微生物对于污水的深度降解处理。村内安装的化粪池是按照每户4人规格设置的深度为 1.2 m 、总容积为 4.0 m^3 的日字形三格化粪池,属无动力型污水处理设施,由于农村技术水平有限,化粪池在运行期间无专业吸污

表2 不同污水处理设施进、出水水质检测结果

污水处理设施	采样点	取水位置	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH值	浊度/NTU	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	粪大肠菌群数/ $(\text{CFU}\cdot\text{L}^{-1})$
集中式微动力	1-1	出水口		8.18	6.97	5.18	518	20.0	0.39	0.88	61.08 ↑	1320
	1-8	进水口	21.2	4.97	7.63	7.66	878	25.0	25.30	3.84	71.52	454000
三户联排小型微动力		出水口	23.2	7.98	6.22	0.73	394	12.5	0.88	2.00 ↑	146.00 ↑	40
	1-11	进水口	22.7	3.70	7.71	16.34	949	15.5	28.62	5.02	113.98	3767
		出水口	20.5	6.36	6.73	1.52	811	19.0	9.64 ↑	7.91 ↑	174.69 ↑	10
	2-4	进水口	13.1	8.08	7.44	5.73	704	9.0	28.45	5.37	378.03	2650
		出水口	13.9	10.52	7.10	1.58	634	9.5	44.50 ↑	5.76 ↑	142.66 ↑	—
三格式化粪池	1-9	出水口	21.4	3.27	7.62	17.09	130	45.5 ↑	50.54 ↑	10.46 ↑	236.87 ↑	11650

注:“↑”表示该指标值超标。下同。

设备对沉淀发酵池底层粪渣进行定期清掏、农户也较为反对手动清理粪渣沉积物,即便清理,若不及时对粪渣做高温堆肥处理,污物散发的强烈刺激性气味也会对空气质量造成一定影响。不及时清掏粪渣使得沉淀发酵池底部粪污淤积过多、无法对粪尿进行充分沉淀,由此造成再发酵池的污染负荷及粪渣增加,再发酵池无法对粪液中寄生虫卵和微生物做充分的厌氧发酵消杀。且化粪池的沉淀发酵池内粪污杂质淤积过多还会堵塞过粪管,影响化粪池正常运行,甚至导致其无法运行^[12-13]。

3.2 生活污水排放情况

农户日常生活污水主要经过3种污水处理设施处理后排入村内修建的沟渠,或直接排入田地,通过沟渠径流和土壤渗流直接或间接排入水库。

据调查,邻库(距离库岸50m以内)部分农户存在一定数量的家禽养殖,养殖污水未经处理直接排入水库,或者排入邻库堰塘,通过堰塘的溢流和土壤渗流间接排入水库,养殖污水的汇入可能对水库水质产生一定影响。针对福善场村邻库库尾右岸50m范围内的两户家禽养殖量较大的农户(1号农户养殖鸡约200只,2号农户养殖鸡、鸭共约280只)进行邻库堰塘水质检测,得出养殖农户住宅邻库堰塘水体SS和粪大肠菌群严重超标,其中1号农户房前堰塘和邻库堰塘水体的COD_{Cr}和TP都严重超标,超标倍数分别是1.55倍和5.52倍(表3)。

由表3可见,若福善场村农户的生活污水处理效果不理想,可能通过地表径流或地下渗流等方式汇入水库,对水库水体水质产生一定程度的影响。因此,必须对农村生活污水的排放及排放水体水质进行有效的控制 and 处理,特别是对饮用水源水库周

边农村生活污水排放进行控制。

4 福善场村生活污水排放对水库水质的影响

汇入水库地表径流除上游补给水渠外,库周地表径流主要通过5条沟渠汇入水库,其中左岸2号和右岸3号沟渠为福善场村汇入水库的主要沟渠(图1),沟渠出口紧邻农户住宅集中区域,左岸1号沟渠、右岸4号沟渠、右岸5号沟渠虽分别经侯家湾、杨家湾、万家冲汇入水库,但沟渠出口离村民住宅集中区域较远,渠水主要以天然径流为主。为对比分析不同沟渠水体水质,进一步明确邻库农村生活污水排放对水库水质的影响,选取5条沟渠汇入水库的渠首以及位于福善场村的库边水体(图1的采样点1-3、1-13、2-6、2-7、2-8、2-9和2-10)水体进行水质检测,结果见表4。由表4可见,除左岸2号沟渠的浊度、SS及粪大肠菌群数严重超标外,其他水质指标均在排放标准以内,说明5条沟渠入库水体的水质整体情况尚好。左岸2号沟渠取水点为福善场村七组沟渠与该水库的交汇处(采样点2-8),该沟渠沿程除靠近福善场村委会附近的部分为浆砌石边墙外,其余很长一段均为土质边墙,渠深变浅,渠内水体主要由沿程农业面源污水和农户生活污水组成,此沟渠水质浊度、SS及粪大肠菌群数的超标,说明该沟渠沿程农户及农田的排放污水水质欠佳。沟渠的入库水体水质略好于岸边浅水区(采样点2-7、2-9和2-10)。对比5条主要沟渠入库水体的水质,邻近福善场村村委会的库尾岸边(采样点1-3)及库尾生态林(采样点1-13)的水体水质情况略差,这两个位置都出现了COD_{Cr}超标现象,说明库岸浅水区水体受邻近农户生活污水排放和农田面源污水的情

表3 库边农户邻库堰塘水质检测结果

堰塘位置	温度/℃	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH值	浊度/NTU	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	粪大肠菌群数/ $(\text{CFU}\cdot\text{L}^{-1})$
1号农户房前	14.8	9.72	7.04	47.88	235	10.0	0.61	0.39	93.12↑	7433
1号农户邻库	12.8	7.10	6.96	超出范围	168	266.5↑	3.92	5.52↑	30.39	411000↑
2号农户邻库	13.3	6.23	7.09	10.25	196	62.5↑	0.37	0.36	34.86	10650↑

表4 库岸主要沟渠入库水质

采样位置	采样点	温度/℃	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH值	浊度/NTU	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	粪大肠菌群数/ $(\text{CFU}\cdot\text{L}^{-1})$
左岸1号沟渠	2-7	13.3	10.69	7.72	12.64	234	5.5	0.24	0.16	26.37	100
左岸2号沟渠	2-8	11.9	11.20	7.86	577.45	244	47.5↑	0.44	0.25	21.31	14600
右岸3号沟渠	2-6	11.0	12.20	7.41	17.43	236	17.0	0.27	0.23	34.27	100
右岸4号沟渠	2-9	13.3	10.74	7.88	9.49	235	12.5	0.25	0.12	27.41	
右岸5号沟渠	2-10	13.7	10.49	7.87	9.69	233	6.5	0.23	0.15	20.41	1000
库尾福善场村库岸水体	1-3	19.0	9.97	7.91	15.14	262	14.0	0.15	0.07	73.44↑	
库尾生态林临岸水体	1-13	22.6	9.76	8.27	12.14	263	24.5↑	0.40	0.06	94.99↑	20

况较为严重。由此可见,邻库农村生活污水的排放直接影响水库水质,经处理但未达标的污水无论是通过地表径流还是地下渗透等方式汇入水库,都将导致水库水体受到污染,进而对人们的生活和健康带来不利影响。因此,研究和实施高效的农村生活污水处理措施,提高库周农村生活污水净化效率是当前保障饮用水源水库水质的关键。

5 结 语

目前鄂西农村生活污水处理方式主要有集中微动力污水处理站、三户联排小型微动力污水处理设施、单户三格式化粪池 3 种方式,经 3 种污水处理方式处理后的污水均未能达到农村生活污水排放要求,其中污水处理效果最优的为集中微动力污水处理站,最差的为单户三格式化粪池。农村生活污水主要通过污水管网排入沟渠或散排进入土壤的方式排放,水体经沟渠地表径流或土壤地下渗流的方式汇入邻村水库水体,农村生活污水处理效果对水库水质产生较大程度的影响。农户家禽养殖产生的生活污水未采取有效处理措施,污水经雨水或堰塘排入水库,对水库水质产生影响。饮用水源水库库周离岸越近的农村,其生活污水排放对水库水体水质影响越大。

根据饮用水源水库邻库福善场村生活污水处理及排放状况调查结果,可见目前鄂西典型农村采用的生活污水处理方式均未能达到理想的处理效果,虽然集中微动力处理站具有最优的处理效果,但出水 COD_{Cr} 指标仍存在超标现象,而三户联排小型微动力污水处理设施和单户三格式化粪池则出现 TP、 COD_{Cr} 、 NH_3-N 指标均超标的现象,可见这两种污水处理设施对鄂西农村生活污水的治理具有一定的局限性。通过村委会和农户入户调查,得出三户联排小型微动力污水处理设施运行电费问题未得到妥善解决,设备间断运行导致生物氧化池在二级处理阶段未发挥其氧化分解有机污染物的作用、三格式化粪池又因粪污清掏等问题造成污染负荷增加及过粪管堵塞现象发生。由此可见,对于农户住宅分散、经济技术落后、紧邻重要水库或河系水体的鄂西农村,急需采用运维简单、费用低廉、低能耗、净水效率高的生活污水处理设施以提升鄂西农村生活污水处理效果,满足污水排放要求。

参考文献:

[1] 罗菊英,周建山,刘健,等. 鄂西南不同地形地貌环境下大雾气候特征分析[J]. 高原山地气象研究,2011,31(4):51-58. (LUO Juying, ZHOU Jianshan, LIU Jian, et

al. Analysis of the heavy mist characteristics in different geographical conditions in the southwest of Hubei Province [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,2011,31(4):51-58. (in Chinese))

[2] 苏新洲,殷志山,施顺英,等. 鄂西地区地形变和地壳稳定性研究[J]. 地壳形变与地震,1995,15(3):96-100. (SU Xinzhou, YIN Zhishan, SHI Shunying, et al. Study on crustal deformation and crust stability in western Hubei [J]. Crustal Deformation and Earthquake,1995,15(3):96-100. (in Chinese))

[3] 高磊. 新时代的生态循环大变革[J]. 城乡建设,2018(13):40-43. (GAO Lei. Great change of ecological cycle in new era [J]. Urban and Rural Development,2018(13):40-43. (in Chinese))

[4] 王丛雅,胡梦娇,黄世业,等. 温州市农村生活污水处理现状与问题[J]. 给水排水,2019,55(增刊1):181-184. (WANG Congya, HU Mengjiao, HUANG Shiye, et al. Present situation and problems of rural domestic sewage treatment in Wenzhou [J]. Water & Wastewater Engineering,2019,55(Sup1):181-184. (in Chinese))

[5] 范彬,穆丹丹,朱仕坤. 关于我国乡村分散污水处理排放标准的思考[J]. 科学技术与工程,2016,16(22):118-125. (FAN Bin, MU Dandan, ZHU Shikun. Reflection on rural decentralized sewage treatment emission standards [J]. Science Technology and Engineering,2016,16(22):118-125. (in Chinese))

[6] 谢林花,吴德礼,张亚雷. 中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(10):865-870. (XIE Linhua, WU Deli, ZHANG Yalei. Analysis and evaluation of China's rural domestic sewage treatment technology [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(10):865-870. (in Chinese))

[7] 夏兴. 我国农村生活污水处理技术的研究进展[J]. 中国资源综合利用,2019,37(9):84-86. (XIA Xing. Research progress of rural domestic sewage treatment technology in China [J]. China Resources Comprehensive Utilization,2019,37(9):84-86. (in Chinese))

[8] 李菊,胡颖铭,彭子宸,等. 四川省农村地区生活污水处理现状调研分析[J]. 四川环境,2020,39(5):164-169. (LI Ju, HU Yingming, PENG Zichen, et al. Investigation and research of the current situation of rural domestic sewage treatment in Sichuan province [J]. Sichuan Environment,2020,39(5):164-169. (in Chinese))

[9] 熊进,田婧. 善溪冲水库引水渠虾子包旱渡槽膨胀土改良试验研究[J]. 水利科技与经济,2018,24(4):76-80. (XIONG Jin, TIAN Jing. Experimental study on improvement of expansive soil in Xiazibao dry aqueduct of diversion canal of Shanxichong reservoir [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2018,24(4):76-80. (in Chinese))

(下转第 88 页)

- 无假定建模技术及应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2019:82-102.
- [8] 闫林,何建新,杨海华. 富胶凝砂砾石材料抗压及抗冻性能研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):197-202. (YAN Lin, HE Jianxin, YANG Haihua. Research on the anti-compression and anti-freeze properties of the cemented sand and gravel material[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(1): 197-202. (in Chinese))
- [9] 姜春萌,宫经伟,唐新军,等. 基于PPR的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法[J]. 建筑材料学报,2019,22(3):333-340. (JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 333-340. (in Chinese))
- [10] GONG J W, JIANG C M, TANG X J, et al. Optimization of mixture proportions in ternary low-heat Portland cement-based cementitious systems with mortar blends based on projection pursuit regression [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117666.
- [11] 宫经伟,陈瑞,曹国举,等. 基于PPR无假定建模的混凝土导热系数计算模型[J]. 建筑材料学报,2020,23(4):948-954. (GONG Jingwei, CHEN Rui, CAO Guoju, et al. Model of thermal conductivity for concrete based on projection pursuit regression non-hypothetical modeling technology [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 948-954. (in Chinese))
- [12] 王晓奇. 水工沥青混凝土配合比的优化及施工质量控制研究[D]. 西安:西安理工大学,2017:31-38.
- [13] 张伟,黄斌,张本蛟. 水工室温沥青混凝土工程特性试验研究[J]. 水利学报,2015,46(增刊1):27-33. (ZHANG Wei, HUANG Bin, ZHANG Benjiao. Experimental study on engineering characteristics of hydraulic room-temperature asphalt concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(Sup1): 27-33. (in Chinese))
- [14] 何建新. 碾压式沥青混凝土心墙坝新技术研究与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2020:126-131.
- [15] 朱洁,冯建刚,高玉琴,等. 基于BWM-CRITIC-TOPSIS的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 8-14. (in Chinese))
- [16] 丁朴荣. 水工沥青混凝土材料选择与配合比设计[M]. 北京:水利电力出版社,1990:152-161.
- [17] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等. 基于改进TOPSIS法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J]. 资源科学,2011,33(3):535-541. (LU Chunyang, WENG Feng, YANG Qiangyuan, et al. An evaluation of urban land use performance based on the improved TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators: a case study of Chongqing [J]. Resources Science, 2011, 33(3): 535-541. (in Chinese))
- [18] 李灿,张凤荣,朱泰峰,等. 基于熵权TOPSIS模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):217-227. (LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 217-227. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-04-23 编辑:骆超)

(上接第62页)

- [10] 高素坤,齐磊,吕明亮,等. 太阳能微动力组合式一体化污水处理设备在农村地区的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(5):678-684. (GAO Sukun, QI Lei, LYU Mingliang, et al. Application of solar micro power modular integrated sewage water treatment equipment in rural areas [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 48(5): 678-684. (in Chinese))
- [11] 严伊竣,王春艳,刘毅,等. 社区化粪池污水能量转化估算与分析研究[J]. 中国环境科学,2023,43(1):143-152. (YAN Yijun, WANG Chunyan, LIU Yi, et al. Estimation and analysis of embodied energy conversion in community septic tank[J]. China Environmental Science, 2023, 43(1): 143-152. (in Chinese))
- [12] 黄川,王里奥,宋珍霞,等. 有效微生物和多功能复合微生物制剂生物强化提高化粪池粪便污泥减量效率研究[J]. 环境工程学报,2010,4(7):1636-1642. (HUANG Chuan, WANG Li'ao, SONG Zhenxia, et al. Study on septic tank nightsoil sludge reduction by bioaugmentation of EM and MCMP[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1636-1642. (in Chinese))
- [13] 张宇航,沈玉君,王惠惠,等. 农村厕所粪污无害化处理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(2):230-238. (ZHANG Yuhang, SHEN Yujun, WANG Huihui, et al. A study on the harmless treatment technology of night soil in rural toilets [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 230-238. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-05-02 编辑:俞云利)