

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.23.004

东太湖岛屿分散型农村生活污水长效治理对策

钱明¹, 钱飞跃^{1,2}, 李勇^{1,2}, 徐思璇¹, 钱斌¹, 刘锋^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009; 2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 江苏苏州 215009)

摘要: 为有效保护太湖水体环境,加强农村生活污水治理,以东太湖某大型岛屿为研究对象,对当地分散型农村生活污水的水质水量特征、管网布置和处理设施运行情况等开展实地调查,并结合生态敏感区保护要求,制订了分散型污水处理设施分级分类管理方案;同时,建议加强农家乐聚集区餐饮类废水的隔油预处理,并在外排太湖和沿岸河流的设施末尾增设人工湿地,以提升其抗冲击和脱氮除磷性能。此外,通过建立区域型智慧水务管理平台,将设施的电耗与进水水质水量动态匹配,可以使运行能耗降低25%以上,长期运行率超过95%。

关键词: 太湖岛屿; 分散型农村生活污水; 污水处理设施; 分级分类管理; 长效运行
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)23-0023-08

Long-term Treatment Strategy of Decentralized Rural Domestic Sewage in East Taihu Lake Island

QIAN Ming¹, QIAN Fei-yue^{1,2}, LI Yong^{1,2}, XU Si-xuan¹, QIAN Bin¹, LIU Feng^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Urban Domestic Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: To effectively protect the water environment of Taihu Lake and strengthen the treatment of rural domestic sewage, a field investigation was carried out in a large island located in East Taihu Lake to investigate the water quality and quantity characteristics of local decentralized rural domestic sewage, collection pipe network layout and operation of treatment facilities. According to the protection requirements of ecological sensitive areas, the partition and classification management scheme of decentralized sewage treatment facilities was developed. It was suggested to strengthen the oil separation pretreatment of catering wastewater in farmhouse tourism regions, and constructed wetlands should be added at the end of the facilities that discharged tail water to Taihu Lake and rivers to improve their impact resistance and nitrogen and phosphorus removal performance. In addition, the energy consumption of the facilities was reduced by more than 25% and the long-term operation rate exceeded 95% by establishing an intelligent regional water management platform and dynamically matching the unit power

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205002); 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室开放课题(2019KF02); 江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目; 中国大学生创新创业训练计划项目(202010332002Z)

通信作者: 李勇 E-mail: yongli69@163.com

consumption of the facilities with the influent quality and quantity.

Key words: island in Taihu Lake; decentralized rural domestic sewage; sewage treatment facility; partition and classification management; long-term operation

近年来,随着乡村振兴战略的全面实施,农村环境治理与美丽乡村建设正在各地持续推进。作为农村人居环境整治的重要内容之一,分散型农村生活污水的长效治理已成为污水处理行业发展的重要细分领域。2016年,我国的农村生活污水产生量为 $83.51 \times 10^8 \sim 125.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,对生活污水进行处理的行政村比例约为20%,东部地区也仅有28.19%^[1]。另外,2017年,对太湖流域苏州、无锡和常州地区210套农村污水处理设施进行调查以后发现,正常运行的比例仅约为48.6%,设施闲置率达到了21.9%^[2]。

当前,农村生活污水处理设施面临的主要挑战包括:①水质水量波动性大、排放不连续;②处理工艺类型繁多,设施耐冲击性、运行稳定性不佳,脱氮除磷效能偏低;③农村排水管网受地形限制,易造成局部管道冲刷或堵塞现象;④设施运维涉及多个部门,权责有待明确,当地资金短缺、技术力量薄弱,难以保障长效运行。

为更好地保护水体环境,苏州地区部分经济发达村镇已计划对农村生活污水采取集中纳管处理,但对于地理位置特殊、地形起伏多变、人口分布较广的太湖岛屿,仍将长期采取分散型污水处理设施的方式。笔者选取太湖一级保护区附近的某大型岛屿,通过对分散型农村生活污水水质水量波动规律、管网分布特征和处理设施运行情况进行调查,并依据地方性农村污水处理设施水污染物相关排放标准,制订了切实可行的分级分类管理方案,并提出了分散型污水处理设施长效运行的管理新方法,旨在为国内类似地区农村污水治理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 调查与采样方法

2018年3月—2019年12月,对岛上46座分散型农村生活污水处理设施的进出水进行采样调查。根据地理位置、污水来源、排污去向和处理工艺等,选取典型处理设施,开展连续运行监测。并以当地污水管网为基础,使用GPS轨迹记录功能,对实际纳污管线进行追溯。

1.2 水质指标和检测方法

主要污染物指标包括COD、氨氮、TN、TP、动植物油和阴离子表面活性剂(LAS)等,分别采用重铬酸盐法、纳氏试剂分光光度法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法、红外分光光度法和亚甲蓝分光光度法测定。

2 结果与讨论

调查岛屿位于东太湖,地形以低山丘陵和平原湖荡为主。截至2018年底,农村常住人口为40761人,农户环湖而居,村落规模小且分散。根据2018年当地政府的报告数据:旅游旺季时,游客人数可超过266万人。农户以果园茶叶种植业、乡村旅游业为主。目前,岛上农村生活污水处理率达到100%。其中,东北部平原地区设有1座集中式污水处理厂,其他未处理的污水采用分散型污水处理设施进行处理。

2.1 分散型污水水质水量特征

岛上分散型农村生活污水中主要污染物监测结果如图1所示。

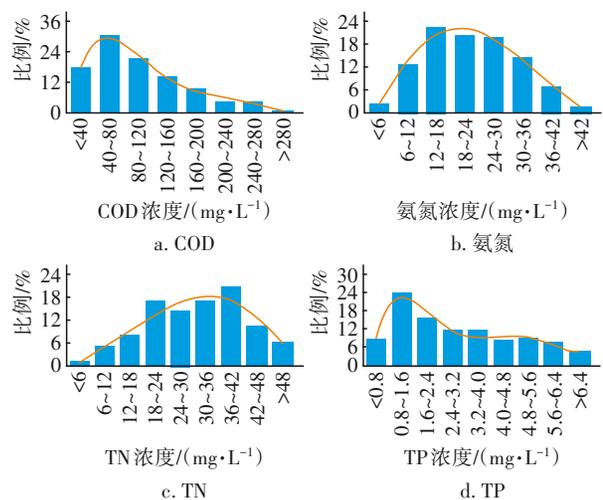


图1 岛上分散型农村生活污水中主要污染物浓度分布
Fig.1 Distribution of main pollutants concentration in decentralized rural domestic sewage of the island

与文献数据(见表1)相比,岛上农村生活污水中COD、氨氮和TN浓度的波动范围更大,其最大值可分别达到最小值的23、18.4和8.8倍,但TP浓度

相对集中。这与岛上乡村旅游业所导致的人口流动密切相关。同时,当地地下水位较高,雨季管道入渗现象明显。总体上看,岛上农村生活污水的平均C/N值仅为3.1,明显低于浙江和江苏等地的3.9~6.1^[3-4],反硝化碳源短缺,限制了生物脱氮效率。

表1 苏南地区分散型农村生活污水水质比较

Tab.1 Comparison of water quality of decentralized rural domestic sewage in Southern Jiangsu

项目	主要污染物浓度范围/(mg·L ⁻¹)				典型C/N
	COD	氨氮	TN	TP	
太湖一典型村庄生活污水 ^[5]	39.0~172.0	6.2~49.1	19.0~87.1	2.3~18.9	2.1
苏南地区村庄生活污水 ^[3]	62.1~234.7	14.1~52.6	19.5~61.5	2.0~4.8	3.9
常熟市沙家浜村庄生活污水 ^[1]	83.0~153.0	32.0~65.0	35.0~87.0	1.8~3.8	3.8
宜兴沙塘港村庄生活污水 ^[6]	8.0~83.0	7.0~30.0	9.0~37.0	0.3~3.8	4.4
太湖岛屿(本研究)	12.7~292.6	2.3~42.4	5.8~51.2	0.3~6.9	3.1

根据污水来源不同,岛上分散型污水可以分为农家乐聚集区排放的餐饮类废水和农户居住区排放的生活污水两大类,具体水质见表2。餐饮类废水中富含动植物油和阴离子表面活性剂,COD浓度可达158.5~316.8 mg/L,明显高于农户生活污水的12.7~268.7 mg/L。

表2 典型餐饮类废水和生活污水水质比较

Fig.2 Comparison of water quality between typical catering wastewater and domestic sewage

项目	COD	氨氮	TN	TP	动植物油	阴离子表面活性剂
餐饮类废水	163.3±51.8	14.4±5.9	21.2±6.15	3.4±0.7	56.5±14.3	61.2±25.3
农户生活污水	114.6±43.7	22.3±9.2	28.2±6.7	5.2±1.1	—	—

根据《饮食业环境保护技术规范》(HJ 554—2010),饮食业含油污水中动植物油的平均浓度为100~200 mg/L,经隔油池预处理后,剩余浓度在60 mg/L以下^[7]。本研究中,岛上餐饮类废水中动植物油浓度为32.0~137.4 mg/L,均值为56.5 mg/L。为

降低后续污水生化处理的难度,有必要进一步加强农家乐聚集区外排水的除油预处理。从营养盐指标上看,农户生活污水中氨氮、TN和TP平均浓度分别比餐饮类废水高出54.9%、33.0%和52.9%。这就要求岛上分散型污水处理设施应当具备较强的脱氮除磷效能。

典型农家乐聚集区和农户居住区分散型污水水量的比较结果如图2所示。

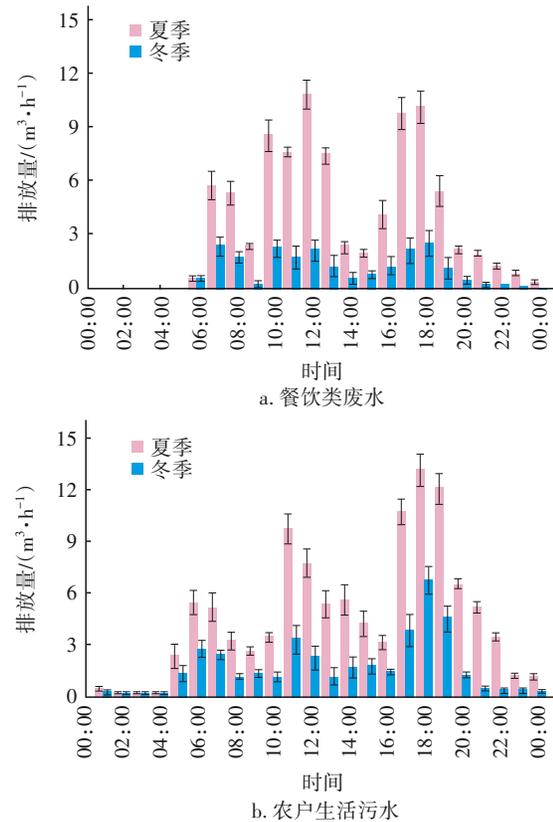


图2 典型农家乐聚集区和农户居住区分散型污水水量的比较

Fig.2 Comparison of water quantity of decentralized sewage from typical farmhouse gathering area and peasant household residential area

由图2可以看出,岛上分散型污水排放量波动性较大。其中,典型农家乐聚集区排水主要集中在07:00—08:00、10:00—13:00、16:00—19:00;农户居住区排水则主要集中在06:00—08:00、11:00—14:00和17:00—20:00。除上述时段外,其余时段的排水量较少,01:00—04:00基本无排水,可能出现断流现象。餐饮类废水和农户生活污水排放量夏季的最大时变化系数分别为7.3和6.1,高于冬季的4.7和4.5。由于苏州地区夏秋季气温高且多雨,

大流量低污染的淋浴排水或降雨会对污水造成一定的稀释,使得春冬季分散型污水中COD、氨氮、TN和TP的平均浓度达到了夏秋季的2.8、3.7、2.5和2.4倍。

2.2 岛上分散型污水收集管网特征

该岛屿属于典型南方丘陵地区,地势起伏多变,分散型污水处理设施大多分布于岛屿外围低洼处,服务于所在自然村。污水收集管网主要采用重力自流,其运行情况将直接影响后续污水处理。岛上不同区域分散型污水收集管网的服务面积和布置形式差异很大(见表3和图3)。

表3 典型自然村排水管网情况

Tab.3 Drainage pipe network situation of typical natural village

设施服务区域	农户或农家乐数量/(家或户)	服务面积/hm ²	地形特征	管网布置形式
农户居住区1	70	6.2	临湖平原	正交式
农户居住区2	32	2.7	临田山区	正交式
农户居住区3	76	7.8	临河平原	平行式
农家乐聚集区	103	4.6	临湖平原	分散式

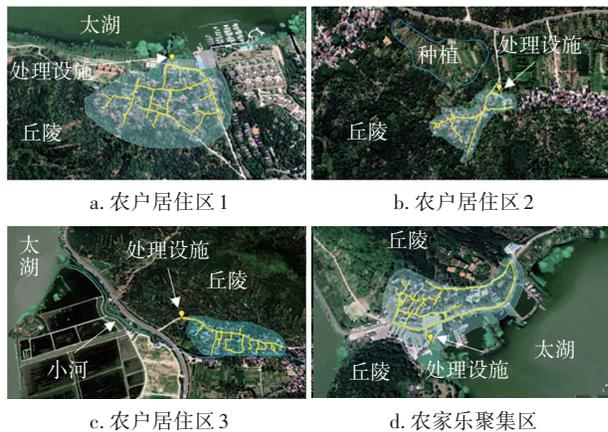


图3 东太湖岛屿不同区域的排水管网布置形式

Fig.3 Layout of drainage pipe network in different areas of East Taihu island

依据排污主干管和地形等高线的相对位置,可将管网分为正交式、平行式和分散式。当主干管与等高线垂直时,管网为正交式,其主干管排水迅速,应重点预防排水峰值对下游设施的冲击。当主干管与等高线平行或呈一定角度时,管网为平行式,其主干管流速较缓,应重点预防管道堵塞。当排水管网呈中间高、两边低时,则为分散式,管内流速变化较大。针对含油的餐饮类废水,应当增加管道养护频次,以防止管道堵塞、溢流等事件的发生。

2.3 岛上分散型污水处理现状分析

目前,岛上分散型污水处理设施有46座,规模在<50、50~100、>100 m³/d的污水处理设施分别占30.4%、58.7%和10.9%。依据工艺类型的不同,单独采用A/O生物接触氧化法(厌氧/好氧分区)、人工湿地(垂直流+表面流)和A/O活性污泥法的比例分别为87.0%、6.5%和6.5%。其中,生物接触氧化法和人工湿地是苏州地区最为常见的农村生活污水处理工艺^[6]。

活性污泥法具有良好的脱氮除磷性能,但悬浮生长的菌胶团很难适应农村生活污水剧烈的水质水量波动,出水水质稳定性较差。相比之下,生物接触氧化法利用填料挂膜,可以获得更高的容积负荷和更好的抗冲击性能,剩余污泥量少,维护管理简单,但由于不设置内回流,其总氮去除率偏低^[8]。

作为一种生态处理工艺,人工湿地不仅可以借助水生植物、填料和微生物的联合作用,有效去除污水中各类污染物,还可以营造区域生态景观,与农村地区环境具有良好的兼容性。但该工艺也存在单位容积负荷低、占地面积大、秋冬季污染物去除效能下降、填料需定期更换等问题。

尽管当地已采取了有效的维护管理措施,确保分散型污水处理设施的长期运行率达到90%以上,但岛上农村生活污水水质和水量的频繁大范围波动仍会对处理设施造成巨大冲击。岛上生物接触氧化法对COD、氨氮、TN和TP的去除率普遍低于人工湿地,也低于文献报道数据(见表4)。

表4 分散型农村生活污水处理设施对污染物的去除率

Tab.4 Removal rate of pollutants by decentralized rural domestic sewage treatment facilities %

项 目		主要污染物去除率			
		COD	氨氮	TN	TP
生物接触氧化法	苏州东山镇农村污水 ^[9]	94.6	90.5	—	80.0
	C/N为2.7的生活污水 ^[10]	85.0	—	67.0	38.5
	本研究	68.8	60.8	36.3	37.5
人工湿地	苏州金庭镇农村污水 ^[11]	88.9	93.0	77.1	91.8
	苏州阳澄湖旅游区污水 ^[12]	94.5	99.4	77.2	92.0
	本研究	79.2	73.1	64.8	71.3

相对而言,人工湿地系统的设计余量比较大,水生植物吸收和填料过滤吸附均可以对氮磷营养

盐产生一定的去除作用,更适合用作直排水体的保障措施。

2.4 污水处理设施分级分类管理方案

考虑到不同区域农村生活污水水质水量波动大、处理工艺种类繁多、排放去向各不相同等因素,采取统一的管理标准很难实现治理设施的长效运行。目前,分级分类管理已成为国内推进农村生活污水治理的重要指导思想。

依据生态环境部《农村生活污水处理设施水污染物排放控制规范编制工作指南(试行)》(环办土

壤函[2019]403号)等政策要求,江苏省于2018年发布了《村庄生活污水治理水污染物排放标准》(DB 32/T 3462—2018),首次对处理设施的分类管理方法提出了明确规定。2020年,江苏省发布了《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462—2020),将设施处理规模与污水排放去向相结合,并单列出需采取特殊保护措施的地区,对分散型污水处理设施的分类标准进行了细化,并从当年11月开始执行,以替代DB 32/T 3462—2018,具体如表5所示。

表5 农村生活污水处理设施水污染物排放限值对比

Tab.5 Comparison of water pollutant discharge limits of rural domestic sewage treatment facilities

标准名称	排放去向	设计处理规模/(m ³ ·d ⁻¹)	标准划分	主要污染物限值/(mg·L ⁻¹)					
				COD	SS	氨氮 ³	TN	TP	动植物油 ⁴
《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462—2020) ¹	环境容量小、生态脆弱、易发生环境污染问题等需采取特别保护措施的地区	—	特别排放限值	50	20	5(8)	20	1	3
	出水排入地表水Ⅲ类功能水域(划定的饮用水水源保护区和游泳区除外)或海水二类功能水域	≥50	一级A	60	20	8(15)	20	1	3
		<50	一级B				30	3	
	出水排入地表水Ⅳ、Ⅴ类功能水域或海水三、四类功能水域	—	二级	100	30	15	30	3	5
		≥50							
	出水排入其他水环境功能未明确水域	—	三级	120	50	25	—	—	20
<50									
《村庄生活污水治理水污染物排放标准》(DB 32/T 3462—2018) ²	饮用水水源保护区,太湖流域一级保护区,国家级生态保护红线	—	一级A	50	—	5(8)	20	1	1
	太湖流域二级、三级保护区,通榆河一级、二级保护区,省级生态保护红线	—	一级B	60	—	8(15)	30	3	3
	其他地区	—	二级	100	—	25(30)	—	—	5

注: ¹表示处理规模<5 m³/d设施不考虑TN和TP指标。²表示处理规模≤2 m³/d设施不考虑TP指标;设施去除率限值:当进水氨氮>40 mg/L时,一级B去除率≥80%(60%),二级≥40%;当进水TN>50 mg/L时,一级A去除率≥60%,一级B≥40%;当进水TP>5 mg/L时,一级A去除率≥80%,一级B≥40%。³表示括号外和括号内分别为>12℃和≤12℃的控制指标。⁴表示按接纳餐饮废水的污水处理设施执行。

依据《江苏省生态空间管控区域规划》(苏政发[2020]号),该岛屿周边的太湖水体属于国家级生态保护红线区,陆地部分整体处于生态空间管控区域。为有效保护敏感水体、推进污水回用和提高维管效率,依据上述标准,对东太湖岛屿上分散型污水处理设施提出了“两类两级或三级”的管理方案,见表6。“两类”是依据污水来源分为餐饮废水和农户生活污水,其中,前者应强化隔油预处理。“两级”是依据DB 32/T 3462—2018排水去向,确定两个排污等级;“三级”是依据DB 32/3462—2020排水去向和规模,确定三个排污等级。

“十四五”期间,《江苏省生态空间管控区域规划》将该岛屿上入湖河道功能区划设定为地表水Ⅲ类,这势必要求进一步提升分散型污水处理设施的脱氮除磷效能。根据以往的运行经验,在现有生物接触氧化法系统后增设人工湿地是最具效费比的改造思路^[6]。工程实践表明,生物接触氧化与人工湿地的组合对苏州地区农村生活污水中COD、氨氮、TN和TP的去除率均可达到80%以上,出水水质稳定达到DB 32/3462—2020中特别排放限值要求^[13]。得益于生物接触氧化法对污水中有机物和氨氮的有效降解,后续人工湿地的占地面积也将大

幅缩减。此外,针对远离太湖而且周边有大面积果园林地的区域,可以将尾水经现有设施处理后回用于农业灌溉,并加强生态沟渠等农业面源污染防治措施。

表 6 岛上分散型农村生活污水设施分级分类管理方案

Tab.6 Partition and classification management scheme of decentralized rural domestic sewage treatment facilities of the island

项目	餐饮废水	农户生活污水		
		临湖平原	临河山区/平原	临田山区
地理位置	临湖平原	临湖平原	临河山区/平原	临田山区
排水去向	太湖湖体	太湖湖体	入湖河流	农业灌溉
DB 32/T 3462—2018	一级 A	一级 A	一级 B	一级 B
DB 32/3462—2020	特别排放	特别排放	一级 A ¹	一级 B
设施数量/座	9	13	11	13
建议处理工艺	隔油池+A/O生物接触氧化法+人工湿地	A/O生物接触氧化法+人工湿地	A/O生物接触氧化法	A/O生物接触氧化法

注: ¹表示处理设施规模均为 50 m³/d。

2.5 污水处理设施长效管理新方法

由于农村生活污水的治理存在进水波动大、设施分布广、工艺类型多等问题,照搬城镇污水厂的管理模式将难以确保分散型污水处理设施的长效运行。目前,该类设施的管理通常涉及投资建设方、使用方、维护方和监管方等多个部门,在缺乏有效沟通手段的前提下,容易造成信息采集、分析和传递的不畅,从而严重影响设施长期运行效率和监管力度。使用“互联网+”建立分散型污水处理设施的智慧水务管理平台,可以为上述问题的解决提供新思路。

参照北京市^[13]和浙江省^[14]的经验,通过建立涵盖传感器、控制设备和后台大数据的网络系统,可以实现上百个处理设施的“分散控制”和“集中管理”,根据在线采集的水量、COD、氨氮、TN 和 TP 等数据,动态调控曝气机和水泵等设备工况。在保证处理设施长效运行的前提下,该系统可以使维护人员减少约 90%、设备能耗降低约 30%,使用寿命明显延长。

作为智慧水务管理的信息源,COD、氨氮、TN 和

TP 等污染物在线监测设备也存在造价昂贵、维护要求高等明显缺点,目前仍然很难实现大范围的应用。有研究表明,氧化还原电位(ORP)与污水中溶解氧、COD、氨氮和硝态氮等指标存在良好的相关性^[15],且其监测方法简单、设备采购和维护费用都相对廉价。

据此,提出了将 ORP 作为水质在线监测指标,通过耦合水质(ORP)、水量(Q)与风机功率(W)等参数,获得同时间段内多个生物接触氧化法设施的平均单位功率(w_0),用于单个设施的运行评估和动态调控,并为线下设备维护提供基础信息,如图 4 所示。相关成果已授权国家发明专利 1 项^[16]。

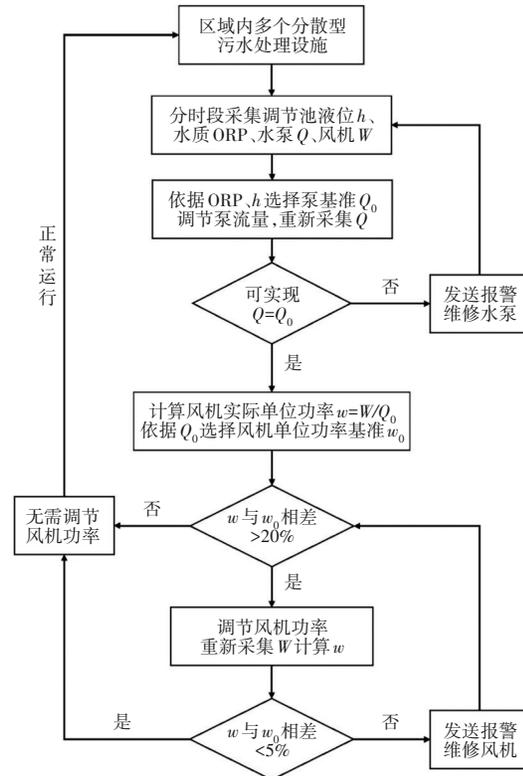


图 4 分散型污水处理设施长效运行技术流程

Fig.4 Technical flow chart of long-term operation of decentralized sewage treatment facilities

采用该方法对岛上 13 座规模为 20~50 m³/d 的分散型污水处理设施进行统一管理。单座 A/O 生物接触氧化法(厌氧/好氧)设施需增设在线 ORP 检测仪、网络电表、变频调节器和可编程逻辑控制器(PLC)等,硬件投资在 1 万元以下,远低于购置传统水质在线监测仪的费用。在为期 1 年的测试中,通过采用风机动态控制,13 座分散型污水处理设施能耗可下降 25.5%~43.4%(见图 5),全年运行率保持

在95%以上。



图5 典型分散污水处理设施水量和风机能耗比较

Fig.5 Water quantity and comparison of fan energy consumption of typical decentralized sewage treatment facilities

3 结论

① 东太湖岛屿旅游业发达,人口频繁流动导致当地农村生活污水水质和水量波动很大,C/N值仅在3.1左右,容易对后续处理设施造成冲击。其中,农家乐聚集区排放的餐饮类废水中COD、动植物油和表面活性剂浓度高于农户生活污水,但后者的氨氮、TN和TP均值分别高出前者54.9%、33.0%和52.9%。此外,分散型污水夏季和冬季的最大时变化系数甚至达到了7.3和4.7。

② 依据江苏省农村生活污水处理设施相关排放标准,对东太湖其岛屿分散型污水处理设施制订了分级分类管理方案,该方案兼顾了污染治理与资源回用。同时,外排太湖或沿岸河流的地区可以采用A/O生物接触氧化与人工湿地组合工艺,以进一步提升现有设施的抗冲击性能和对TN、TP的去除能力。

③ 在加强污水管网维护保养的同时,建立区域型智慧水务管理平台,可实现分散型污水处理设施的“集中管理、分散控制”。通过耦合水质(ORP)、水量(Q)与风机功率(W)等参数,对设施运行实施动态调控,使得污水处理能耗降低了25%以上。该方法在分散型污水处理设施长效管理中具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 于法稳,于婷. 农村生活污水治理模式及对策研究[J]. 重庆社会科学, 2019(3): 6-17.
YU Fawen, YU Ting. Study on the model and countermeasure of rural domestic sewage treatment[J]. Chongqing Social Sciences, 2019 (3): 6-17 (in

Chinese).

- [2] 张亚平,王海芹,印杰,等. 太湖流域农村生活污水处理技术模式调查和分析——以江苏省为例[J]. 农业资源与环境学报, 2017,34(5): 483-491.
ZHANG Yaping, WANG Haiqin, YIN Jie, *et al.* Investigation and analysis on technical modes of rural domestic sewage treatment in Taihu Lake basin: taking Jiangsu Province as an example [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34 (5): 483-491 (in Chinese).
- [3] 冯华军,冯小晏,薛飞,等. 浙江省典型地区生活污水水质调查研究[J]. 科技通报, 2011, 27 (3): 436-440.
FENG Huajun, FENG Xiaoyan, XUE Fei, *et al.* Sewage quality investigation research in typical region of Zhejiang Province [J]. Bulletin of Science and Technology, 2011, 27(3): 436-440 (in Chinese).
- [4] 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 influent quality of wastewater treatment facilities in rural areas of Jiangsu Province, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3): 1445-1449 (in Chinese).
- [5] 林常源,杨建成,宋增忠. 太湖流域农村生活污水处理工程的应用分析[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35 (12): 53-55.
LIN Changyuan, YANG Jiancheng, SONG Zengzhong. Application analysis of rural domestic sewage treatment project in Taihu Lake basin [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35 (12): 53-55 (in Chinese).
- [6] 吴昊,杨非,王海芹,等. 太湖流域4种农村生活污水处理工艺运行效果比较[J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (13): 309-313.
WU Hao, YANG Fei, WANG Haiqin, *et al.* Comparison of operation effects of four rural domestic sewage treatment processes in Taihu Lake basin [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 309-313 (in Chinese).
- [7] 苏翔,王佳,张伟进. 曝气量对好氧填料床处理农家乐生活污水的影响[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2013, 30(12): 57-62.
SU Xiang, WANG Jia, ZHANG Weijin. Influence of different aeration rates on “farm fun” sewage treatment

- in aerobic packed bed [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2013, 30(12):57-62(in Chinese).
- [8] 吴智仁,彭娇,吴春笃,等. 新型生物接触氧化载体及其实验研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(1): 52-55.
WU Zhiren, PENG Jiao, WU Chundu, *et al.* Experimental study of the new type biological contact oxidation carrier [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(1): 52-55(in Chinese).
- [9] 许伟,杨积德,张建荣,等. 太湖流域农村生活污水治理技术比选研究——以东山镇为例[J]. 环境科技, 2016,29(3):45-48.
XU Wei, YANG Jide, ZHANG Jianrong, *et al.* Comparison research on technology of rural sewage treatment in Taihu region:a case study in Dongshan Town [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 29(3): 45-48(in Chinese).
- [10] 孙鹏展,吴俊奇,康利民. 溶解氧对多段式生物接触氧化法脱氮除磷的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23):341-346.
SUN Pengzhan, WU Junqi, KANG Limin. Effect of dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus removal by multi-stage biological contact oxidation [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(23):341-346(in Chinese).
- [11] 杜滢明,邢蓓燕,严志豪,等. 组合型人工湿地处理农村生活污水的效能分析[J]. 净水技术, 2019,38(4): 16-20.
DU Yingming, XING Beiyuan, YAN Zhihao, *et al.* Efficiency analysis of hybrid constructed wetland for rural domestic wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(4): 16-20 (in Chinese).
- [12] 杜建强,陈晓娟,皇甫铮,等. 潜流型复合人工湿地处理旅游区生活污水[J]. 中国给水排水, 2011,27(2): 39-42.
DU Jianqiang, CHEN Xiaojuan, HUANGFU Zheng, *et al.* Integrated subsurface constructed wetland for treatment of domestic wastewater in tourist zone [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(2): 39-42(in Chinese).
- [13] 张效苇,崔克力,范力杰,等. 农村分散污水处理设施在线远程监控管理系统设计与实现[J]. 给水排水, 2019,45(7):128-132.
ZHANG Xiaowei, CUI Keli, FAN Lijie, *et al.* Design of online remote monitoring and management system for rural dispersed sewage treatment facilities [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(7): 128-132 (in Chinese).
- [14] 敖旭平,徐斌,金凡,等. 智慧水务在农村生活污水治理中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 34-36.
AO Xuping, XU Bin, JIN Fan, *et al.* Application of smart water system to rural domestic sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 34-36 (in Chinese).
- [15] 王涛,徐跃飞,陈贵生,等. ORP用于优化改良型Carrousel氧化沟脱氮的研究[J]. 中国给水排水, 2012,28(21):16-19.
WANG Tao, XU Yuefei, CHEN Guisheng, *et al.* Application of oxidation reduction potential to nitrogen removal in modified Carrousel oxidation ditch [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 16-19(in Chinese).
- [16] 李勇,钱明,徐思璇,等. 一种分散型污水处理设施的运行管理方法:ZL201910891516.2[P]. 2019-09-20.
LI Yong, QIAN Ming, XU Sixuan, *et al.* An Operation and Management Method of Decentralized Sewage Treatment Facilities:ZL201910891516.2[P]. 2019-09-20(in Chinese).

作者简介:钱明(1982-),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事水污染控制理论与技术研究。

E-mail:94675728@qq.com

收稿日期:2020-07-30

修回日期:2020-09-27

(编辑:任莹莹)