

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.02.003

农村生活污水治理技术应用的浙江经验及发展方向

孔令为^{1,2}, 邵卫伟¹, 叶红玉¹, 梅荣武¹, 廖敏³, 郑展望⁴, 王晓敏¹,
徐志荣¹

(1. 浙江省生态环境科学设计研究院, 浙江 杭州 310007; 2. 西湖大学 工学院, 浙江 杭州 310024; 3. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058; 4. 浙江农林大学 农村环境研究所, 浙江 临安 311300)

摘 要: 概述了 2003 年以来浙江省农村生活污水治理技术发展的经验,并依托于课题组对 530 多个农村生活污水处理终端调研、评估的研究成果,从浙江省农村生活污水的水质特点、治理技术工艺应用等方面进行归纳总结,并选取具有代表性的案例进行详细的分析;同时,还结合现阶段浙江省农村生活污水的工作重点对运行维护管理进行了梳理,从大数据监测、分析以及反馈指导运维等方面提出了下一步工作方向优化的建议。

关键词: 农村生活污水; 自通风生物滤床; 一体化技术; 标准化运维; 大数据分析
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)02-0012-06

Experience and Development Direction of Application of Rural Domestic Wastewater Treatment Technology in Zhejiang Province

KONG Ling-wei^{1,2}, SHAO Wei-wei¹, YE Hong-yu¹, MEI Rong-wu¹, LIAO Min³,
ZHENG Zhan-wang⁴, WANG Xiao-min¹, XU Zhi-rong¹

(1. Zhejiang Academy of Ecological Environmental Design and Research, Hangzhou 310007, China; 2. School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China; 3. College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Institute of Rural Environment, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China)

Abstract: This study summarized the experience and development of rural domestic wastewater treatment technology in Zhejiang Province since 2003. Based on the research results of more than 530 rural domestic wastewater treatment facilities, this paper summarized the water quality characteristics of rural domestic wastewater and the application of treatment technology in Zhejiang Province. The representative cases by research group were analyzed in detail. At the same time, this study analyzed the key work of rural domestic wastewater treatment in Zhejiang Province at the present stage, and combed the operation and maintenance management. The next work direction optimization was proposed from the aspects of big data monitoring, analysis and feedback guidance operation and maintenance.

Key words: rural domestic sewage; self-ventilation biological filter bed; integrated technology; standardized operation and maintenance; big data analysis

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07208-009、2017ZX07206-004); 浙江省重点研发计划项目(2019C03110); 浙江省自然科学基金资助项目(LY18E080005)

通信作者: 叶红玉 E-mail: yehongyu98@foxmail.com

1 浙江省农村生活污水治理的背景及进展

浙江省的农村生活污水治理工作一直走在全国前列,从2003年开始到现在,已经走过了16年的历程,以“千村示范、万村整治”工程为主抓手,实施了卫生改厕、百万农户净化沼气池、五整治一提高、中央农村环境综合整治、五水共治农村生活污水三年行动等一系列工程,积累了丰富的农村环境治理的实践经验,美丽乡村建设举国瞩目,浙江省“千村示范、万村整治”工程于2018年9月获得了联合国环境规划署的“地球卫士奖”。

但从全国来看,还有近80%的村庄生活污水没有得到处理,接下来全国各地的农村污水治理是国家乡村振兴战略的重点任务。为展示浙江省农村生活污水治理的经验,着重从技术规范制定、工程设计与评估、运行维护等角度对多年的课题研究和项目成果^[1-5]进行了总结,希望能为全国的农村生活污水治理提供浙江的经验,并为下一步工作的开展梳理出可优化的方向。

2 浙江省农村生活污水治理技术

2.1 工艺类型及进、出水水质特征分析

笔者所在课题组(以下简称课题组)于2017年对浙江省全省的农村生活污水治理工作进行了较大样本容量的调研和评估。调查中发现,浙江省530个农村生活污水治理工程主要包括以下处理技术类型:①纳管进厂(占比为20.93%);②厌氧或厌氧+生态处理(厌氧工艺如厌氧池,沼气池等,占比为36.03%);③好氧或好氧+生态处理(好氧工艺如A/O、A²/O、微动力等,占比为33.04%);④生物滤床(占比为1.79%);⑤膜生物反应器及其耦合工艺(占比为1.20%);⑥其他工艺(如生物转盘、土壤渗滤等各种不常见工艺的汇总,占比7.01%)。

调研案例的进水浓度统计结果表明,浙江省农村生活污水COD为96.57~343.67 mg/L,平均为186.35 mg/L;NH₄⁺-N为17.32~41.27 mg/L,平均为30.33 mg/L;TP为2.00~5.40 mg/L,平均为4.06 mg/L,且各城市之间的主要进水水质指标存在显著性差异($P < 0.05$)。温州、嘉兴、台州、湖州、舟山、金华等地进水COD平均浓度较高,台州、舟山、杭州、湖州等地NH₄⁺-N浓度较高,而台州、绍兴、温州、湖州则是进水TP浓度较高,这与这些地区的海鲜食品加工等有关。而丽水、衢州等地的进水污染物浓度相对较低,是因为这些地区的农村处于山

区或半山区较多,其供水和用水习惯使生活污水的污染物浓度得到稀释从而较低,同时也与调研时雨、污分流不彻底导致的雨水汇入管网以及与化粪池新/改建不到位所导致的进水成分以洗涤水等为主有关。

调研发现有大量纳管进厂处理的工程案例且未对污水处理厂出水进行进一步调查,结果表明,浙江省农村生活污水处理出水COD、NH₄⁺-N、TP平均浓度分别为35.62、10.90和1.55 mg/L。同时还发现,出水COD浓度相对较高的城市有温州和舟山,出水NH₄⁺-N浓度相对较高的城市有湖州、杭州、嘉兴和金华等,而TP浓度相对较高的城市有湖州和舟山等。如前所述,这些地区的进水浓度也普遍较高。

此外,通过对数据的分析还可知,本次调研所获得全省农村生活污水进水的平均C/N=6.14,与冯华军等^[6]调研结论(C/N=6.10)一致。同时发现,调研中C/N最高的地区为温州市(C/N=12.95),最低为衢州市(C/N=4.18),相较于江苏省的情况^[7](C/N=3.90)则更有利于生物脱氮除磷。

2.2 治理技术工艺应用研究

2.2.1 治理技术及工艺调研

为更好地推进浙江省的“五水共治”工作,课题组于2014年编写了《浙江省农村生活污水治理实用技术手册》,对浙江省农村生活污水治理的管网、技术工艺和模式选择以及建设和运维等各方面制定了技术规范,并通过省农办和环保部门面向全省发布。《浙江省农村生活污水治理实用技术手册》在案例分析和总结的基础上,归纳出浙江省农村生活污水治理领域的“十大”实用技术,包括预处理+生态滤床技术、厌氧+A²/O技术、厌氧+潜流式人工湿地技术等^[8]。

另外,课题组在2015年开展的浙江省农村生活污水减排核查中针对工艺技术进行了问卷调研^[8],发现调研实例的主要工艺有厌氧+人工湿地技术(50%)、预处理+A/O技术(25%),同时处理规模为10~50 m³/d的终端占比在64.28%以上。而从课题组2017年所调研的结果可知,厌氧、厌氧+生态处理工艺(包括人工湿地、生态塘、生物滤床技术等)占比为44.23%,A/O和A²/O+生态处理工艺占比为35.54%,微动力以及微动力+生态处理工艺占比为6.24%。本次调研结果与2015年的问卷

调查结果相比存在一定的差异,这与2015年问卷调查的样本量较小,不足以全面反映浙江省的技术工艺选择有关,而好氧及微动力工艺的占比增加同时也说明了随着“五水共治”的深入推进,全省各地对出水水质的要求也越来越高,因此对农村生活污水治理终端的技术和工艺要求也逐步提高。

进一步分析还可以发现,浙江省采用好氧、好氧+生态处理工艺的地区主要有杭州、嘉兴、湖州、舟山等,以厌氧、厌氧+生态处理工艺为主的地区有温州、金华、衢州、丽水等,这显示出农村生活污水治理工艺的选择受到地形、地理位置以及经济发展的影响比较显著,浙江省北部较发达地区多是平原河网地区,其污染物浓度相对较高,因此对治理技术以及处理工艺的要求也较高,而中部和南部因山区较多,选择厌氧、厌氧+生态处理工艺的相对较多。相比较而言,绍兴对各种工艺的选择更为均衡,还尝试了土壤渗滤等其他技术。

2.2.2 典型案例研究

① 新型自通风生物滤床-人工湿地耦合技术

新型自通风生物滤床-人工湿地层叠耦合的生活污水处理关键技术,通过自通风强化增氧系统、生物滤床与人工湿地层叠耦合^[9-10]以及填料优化选择和级配等方面进行技术优化,并开发了新型布水、防臭气装置及低温强化技术以提升和稳定运行效果。课题组在杭州市余杭区求是村构建了50 m³/d的中试系统,对比了混合过滤石材的原有系统和采用不同填料的改进系统对污染物的去除效果^[9]。中试结果表明,改进系统对COD、NH₄⁺-N、TN和TP的去除率分别为74.10%、94.14%、73.57%和69.53%,显著优于原有系统;填料的优化配置对污染物去除效率的提升效果显著^[9]。

2018年5月—10月,第三方的检测结果表明,中试工程出水COD、NH₄⁺-N、TN和TP平均浓度分别为22.0、3.15、8.53和1.24 mg/L,稳定达到浙江省地标《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 33/973—2015)的一级标准(该一级标准的COD为60 mg/L, NH₄⁺-N为15 mg/L和TP为2 mg/L,该标准对TN未作要求)。

该技术已在浙江省杭州、温州、衢州、丽水等地成功推广和工程应用160余项,并作为浙江省“千村示范、万村整治”工程的一个技术实践和亮点,助力了浙江省2018年的联合国“地球卫士奖”。

② 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷技术

针对已建成农村生活污水治理终端所存在的出水水量及水质不稳定、占地比较大、投资及运行成本高等问题,开展了基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷技术研发和工程示范。设备结构及现场见图1。

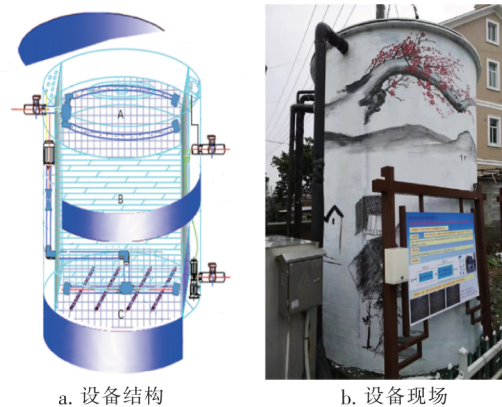


图1 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷设备结构及现场图
Fig.1 Structure and site diagram of integrated nitrogen and phosphorus removal equipment based on bamboo fiber filler

基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷技术将多种水处理工艺、有机及天然高分子填料、曝气设备、新型布水系统、液位智控系统等技术进行了集成,对污水进行强化去污。课题组选取了余杭区的漕桥村桥北(20 m³/d)、求是村桥北组(10 m³/d)、求是村苏家头(10 m³/d)、求是村渣河墩(10 m³/d)和前溪百步村(20 m³/d)等5个农村生活污水处理终端进行了提升改造工程,在原有处理终端的基础上采用一体化处理装置对尾水进行深度处理。2018年5月—10月,第三方检测结果表明,基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷技术对COD、NH₄⁺-N、TN和TP的去除率分别在72%、79%、72%和45%以上,5个示范工程的一体化设备出水COD、NH₄⁺-N、TN和TP平均浓度分别为25.33、3.93、10.24和1.31 mg/L,稳定达到《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 33/973—2015)的一级标准。

基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷技术具有出水稳定、工艺灵活多变、可模块化组合等特点,结合竹纤维、轻质改性陶粒等填料^[11],不但可用于已建成农村生活污水治理终端的提升改造,还可根据出水水质要求作为新建终端的主流工艺,将多个一体化单体进行串联、并联组合,实现不同的水处理功能。例如,可选择第一个一体化单体作为调节池或厌氧处理单元,后续串联或并联多个用作好氧处理

单元的一体化单体,确保出水水质达标;同时,还可以将一体化单体按照 SBR 等工艺操作模式运行,更加节省空间。

3 浙江省农村生活污水治理运维管理

3.1 运维管理调研

课题组前期在浙江省农村生活污水治理工程运维方面也进行了长期研究,提出了相应对策以及长效管理方面的建议^[12-13]。在 2017 年针对浙江省农村生活污水治理的调研和评估工作中也对第三方运维的开展情况做了初步的统计和分析,截止到 2018 年底,浙江省 82 个县(市、区)的处理设施已委托专业的运维机构进行运行维护。同时,按照农村生活污水运维的主管部门要求,各地区均已陆续开展了运维平台的建设,且取得了初步成效。截至目前,建立较完善运维监管平台的比例约为 65% (温州、丽水市相对滞后),所调研农村生活污水治理终端安装在线流量计以及视频监控的比例均在 20% 左右。

部分企业运维平台及在线视频监控现场如图 2 所示。



图 2 部分企业运维平台及在线视频监控现场

Fig.2 Operation and maintenance platform and online video monitoring of enterprises

2015 年以来,浙江省逐步推动农村生活污水处理终端移交验收工作。积极开展农村生活污水处理体系政策机制的建立,已经发布和正在起草的政策文件和标准导则已多达十几项,除了早些年出台的《农村生活污水处理技术规范》(DB 33/T 868—2012)、《浙江省人民政府办公厅关于加强农村生活污水处理设施运行维护管理的意见》(浙政办发〔2015〕086 号)、《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 33/973—2015)外,后续密集安排了一系列政策和导则的起草和出台,包括《关于推进农村生活污水处理设施标准化运维工作的通知》(浙建村发〔2019〕95 号)、《农村生活污水处理设施

运行维护技术导则》《农村生活污水处理设施出水水质检测与结果评价导则(试行)》《农村生活污水处理设施第三方运维服务机构管理导则(试行)》,以及《浙江省农村生活污水企业水质检测化验室建设导则(草案)》和正在起草的《浙江省农村生活污水处理设施建设和改造技术规程》等,为建好、用好、管好全省的农村生活污水处理设施的运维及管理工作提供充足的依据。

2019 年以来,浙江省在农村生活污水处理终端的运维管理方面新的经验和做法不断涌现。在政府管理上,湖州市拟建立和推广县、镇、村三级污水处理终端(处理站)站长制,理清终端站长和第三方运维机构的职责边界;企业在运维管理上也不断进行技术创新,采用多种办法降低运维成本,如在现有物联网运维技术的基础上加入了不同传感器,可进一步对管网、窨井、化粪池以及各处理单元的液位、溶解氧等参数进行实时监测和预警,通过大数据的积累和分析对未来可能发生的情况进行有效预测,有针对性地针对某区域、某治理终端、某工艺单元、某段管网等的运维进行精确指导,大大减少了不必要的人力、物力和财力的投入。在资金保障方面,针对自然灾害多发、地方财力相对薄弱的现状,丽水市试点引入保险机制,以提高农村生活污水处理终端、管网及配套设施财产抗风险能力。

为进一步规范和推动运维市场健康发展,浙江省成立了浙江省农村生活污水处理能力评价中心专家委员会,开展农村生活污水处理设施标准化运维。截止到 2019 年上半年,浙江省已完成 983 个农村生活污水处理设施的标准化运维任务,占年度新增 1 500 个试点任务数的 65.53%。

3.2 运维管理中存在的问题

虽然浙江省农村生活污水处理设施运维及管理工作走在全国前列,但还存在很多问题,将在接下来的工作中不断改进完善。

① 处理设施运行及管理方面。随着“十四五”对水体排放要求的不断提升,《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 33/973—2015)有待于进一步修订,特别是应重点对处理设施出水排入湖泊、水库等封闭水体,或磷不达标的情况进行限定,执行更高标准,同时也应对 TN 提出要求;处理设施运行费用一般是根据上位规划由省、市、县、乡

镇等多级筹措,未能吸引社会资本参与到农村生活污水的治理及运行维护中,因此应调动社会资本的积极性,对资金筹集模式进行创新。此外,随着技术的不断发展,特别是新工艺的应用,对管理人员提出了更高技术要求,而目前从事管网和处理设施运行与维护的技术人员专业技能有待于进一步提升。

② 运维平台及其管理方面。农村生活污水治理终端的运维平台分为企业端和政府端,主要包括终端站点的区域位置展示、设计和建设资料、水质和水量监测及分析、工况远程控制、视频和图像采集、突发事件预警等功能,一般采用平台管理终端或APP终端操作。虽然涌现出了不少企业运维管理平台,但平台间的数据存在差异,缺少全省统一的数据类型和规范接口;同时,课题组在对企业调研和评估时发现许多企业的平台功能不全,缺少数据分析、反馈控制等模块,还有些通病是无法通过所建立的平台数据分析有效地对企业的运行维护进行指导、预警后不能智能化分析和开展针对性的反控。

3.3 运维管理发展方向

① 建立健全农村生活污水治理运维及管理平台,加快企业平台与省级平台数据的规范和接入汇总,通过大数据分析指导下阶段浙江省农村生活污水治理顶层设计工作的开展。同时,通过企业端农村生活污水治理运维及管理平台功能的构建和完善,更好地指导企业运维和管理的实践。

② 积累大数据,开展对不同区域环境、不同经济条件、不同进水条件以及采用不同技术工艺和模式治理终端的数据分析,对不同技术工艺的运行参数进行归纳总结和综合评估,筛选出不同区域、经济条件和应用场景下的实用治理技术,针对其技术总结处理效果和达标率,对该技术以后全国推广的适用范围进行界定,为其他省市及全国在农村生活污水治理技术、运维及管理的需求上贡献浙江经验。

③ 不断挖掘大数据,通过分析溶解氧、pH值、温度、水质、水力停留时间等因素对农村生活污水治理技术、运维及管理效率的影响,找出该技术工艺的运行规律,预测出不同节点所需做出的运维和管理措施,节约企业运行成本和提升工作效率。

④ 通过对所积累的大数据进行分析,可对在线监测系统精准度进行优化和调校,同时还可以结合人工智能等技术手段采用新的监测方法以降低监测设备的成本。

4 总结与展望

浙江省农村生活污水治理经验已经成为浙江的一张名片。从浙江省农村生活污水治理发展的历程中可以发现开展蓝图谋划顶层设计,以及不断持续创新的重要性。对浙江经验的总结也仅仅是在特定时间节点上站在了一个有限的高度,并不能完全系统性地反映浙江在本领域所开展的工作,因此其他省市在借鉴浙江经验时应该立足于自身实际情况制定长远的规划,有针对性地从事政策、标准、适用技术、建设、监测、运维等多方面有序开展工作。

未来加快数字化、智能化对于传统农村生活污水治理行业技术的赋值,可以有效推动环境治理体系和治理能力现代化。如,现阶段通过浙江省农村生活污水治理设施运维管理平台能够实现对水质、水量变化的大数据监测和分析,可以精确地指导企业端的运行维护来降低运行维护成本、实时发现设备故障以迅速解决问题等,而诸如此类在实践中衍生出来的创新可以促进环保产业的发展和行业的技术进步,涌现出一个又一个的模式和经验,加速美丽中国建设目标的实现。

参考文献:

- [1] 叶红玉,王浙明,金均,等. 农村生活污水治理政策体系探讨——以浙江省为例[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(6): 90-95.
YE Hongyu, WANG Zheming, JIN Jun, et al. The research on policy system for treatment of rural domestic sewage—a case study of Zhejiang Province [J]. Agro-Environment and Development 2011, 28(6): 90-95 (in Chinese).
- [2] 叶红玉,曹杰,王浙明,等. 浙江省农村生活污水处理技术模式导向研究[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(3): 95-99.
YE Hongyu, CAO Jie, WANG Zheming, et al. Study on technology guidance of rural domestic sewage treatment mode in Zhejiang Province [J]. Environmental Science and Management 2012, 37(3): 95-99 (in Chinese).
- [3] 郑展望. 浙江省新农村建设污水治理新格局探析[J]. 浙江建筑, 2018, 35(2): 37-39, 45.
ZHENG Zhanwang. Analysis on the new situation of sewage treatment in new rural construction of Zhejiang Province [J]. Zhejiang Construction 2018, 35(2): 37-39, 45 (in Chinese).
- [4] 徐志荣,叶红玉,卓明,等. 浙江省农村生活污水处理

- 现状及其对策[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 473-477.
- XU Zhirong, YE Hongyu, ZHUO Ming *et al.* Status quo and strategies of rural sewage treatment in Zhejiang Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment 2015 31(4): 473-477 (in Chinese).
- [5] 蒋涛, 李亚, 盛安志, 等. 农村生活污水治理模式与技术研究综述[J]. 环境与可持续发展, 2018, 43(4): 79-83.
- JIANG Tao, LI Ya, SHENG Anzhi *et al.* Review of rural sewage treatment modes and technologies [J]. Environment and Sustainable Development, 2018, 43(4): 79-83 (in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 周晓莉, 俞锋, 朱光灿, 等. 江苏农村生活污水处理设施进污水水质调查分析[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).
- [8] 崔霞, 孔令为, 韦彦斐, 等. 浙江省农村生活污水减排核查技术规范初稿的研究[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(3): 159-164.
- CUI Xia, KONG Lingwei, WEI Yanfei, *et al.* Study on the making of draft version technical specifications of Zhejiang Province rural sewage emission reduction verification [J]. Environment and Sustainable Development 2016 41(3): 159-164 (in Chinese).
- [9] 孔令为, 张义, 汪璐, 等. 新型生物滤床—人工湿地耦合系统强化处理生活污水研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(7): 110-114.
- KONG Lingwei, ZHANG Yi, WANG Lu *et al.* Study on domestic wastewater enhanced treatment by a new coupled system of biofilter bed—construct wetlands [J]. Technology of Water Treatment 2018 44(7): 110-114 (in Chinese).
- [10] 裘知, 胡智锋, 孔令为, 等. 叠层生态滤床技术在水处理中的应用研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(12): 43-45, 49.
- QIU Zhi, HU Zhifeng, KONG Lingwei, *et al.* Research on engineering application of laminated ecological filter bed in the treatment of domestic sewage [J]. Environmental Pollution and Control, 2014, 36(12): 43-45, 49 (in Chinese).
- [11] KONG L W, WANG L, WANG Q R *et al.* Study on new artificial floating island removing pollutants [J]. Environment Science Pollution Research 2019 26(17): 17751-17761.
- [12] 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(1): 38-40.
- HU Zhifeng, YE Hongyu, KONG Lingwei, *et al.* Research on the operation management of rural domestic sewage treatment facilities [J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(1): 38-40 (in Chinese).
- [13] 武璐, 王浙明, 何志桥, 等. 浙江省农村生活污水治理设施的长效管理机制研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(11): 6-9.
- WU Lu, WANG Zheming, HE Zhiqiao *et al.* Long-term management mechanisms of rural domestic sewage treatment facilities in Zhejiang Province [J]. Environmental Science and Management 2015 40(11): 6-9 (in Chinese).
- 作者简介: 孔令为(1984-), 男, 河南商丘人, 博士, 副研究员, 主要从事人工湿地、河道、湖泊生态修复、生活污水治理、环保材料研发、环境/人工智能新技术以及小流域环境综合治理相关的研究、技术成果转化及工程应用。
- E-mail: lw.kong@163.com
- 收稿日期: 2019-11-26
- 修回日期: 2019-12-18

(编辑: 丁彩娟)