

“双碳”背景下的乡镇污水处理厂及配套管网设计优化的要点

蒋志刚

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南长沙410200)

摘要:为了进一步推动乡镇污水处理的低碳节能发展,本文通过分析当前乡镇污水治理现状及收集、处理、施工和运维管理等环节存在的问题,并结合国家“双碳”目标的政策背景以及以往的设计、施工和运营经验,总结提出了“双碳”背景下的污水处理厂及配套管网设计的优化要点。结果表明:通过优化设计能够有效解决高标准设计、高成本投入及运营困难等问题。本文成果可为乡镇污水处理系统的低碳化、节能化、智能化和高质化转型提供借鉴与参考。

关键词:低碳节能;生活污水;乡镇污水厂;配套管网;优化设计

中图分类号:TU973+.23

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)08-0070-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.08.104

Key points for design optimization of township sewage treatment plants and supporting pipe networks under background of “double carbon”

JIANG Zhigang

(Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, Hunan, China)

Abstract: In order to further promote the low-carbon and energy-saving development of township sewage treatment, the current situation of township sewage treatment and the problems existing in collection, treatment, construction and operation and maintenance management are analyzed, and the policy background of the national “double carbon” goal and the previous design, construction and operation experience are combined, the optimization points of sewage treatment plant and supporting pipe network design under the background of “double carbon” are summarized and proposed. The results show that the problems of high standard design, high cost investment and operational difficulties can be effectively solved by optimizing the design. The results can provide reference for the low-carbon, energy-saving, intelligent and high-quality transformation of township sewage treatment systems.

Key words: low-carbon energy saving; domestic sewage; township sewage plant; supporting pipe network; optimal design

污水处理领域是一个涉及“双碳”目标的重要过程,既包含碳排放环节,也包含碳减排潜力。污水处理工艺过程通常需要消耗大量电力和药剂,污水处理行业属于高能耗行业之一。同时处理废水的过程也会产生大量的温室气体。然而,污水经过处理后,可以显著减少对环境的污染,从而实现污染物的减排目标。在“双碳”政策出台后,

生态环境部针对环境保护行业印发了《减污降碳协同增效实施方案》。该方案明确提出了推进水环境治理环节碳排放协同控制的具体措施。此外,方案还要求开展城镇污水处理和资源化利用的碳排放测算,优化污水处理设施的能耗和碳排放管理。以资源化、生态化和可持续化为导向,因地制宜推进农村生活污水集中或分散式治理及就近

收稿日期:2023-07-18

作者简介:蒋志刚(1985—),男,高级工程师,从事市政给排水、海绵城市、管线迁改等方面的设计工作。

回用。因此，在“双碳”政策背景下，污水处理领域已成为环境保护关键细分领域之一，我国污水处理行业将进入新的发展阶段。

在“碳中和”的大背景下，近年来许多研究者对污水领域的低碳工艺开发与碳中和路径的探索主要集中在城镇污水处理厂^[1-2]，而对乡镇污水处理低碳发展的研究相对较少。王波等^[3]从系统观念、考核办法、标准制(修)订、举措创新、试点示范等方面，提出了农村污水资源利用的实现路径；王慧芳等^[4]采用“厌氧-缺氧-沉淀-好氧”联合“硫自养脱氮滤池”的工艺，并在设计中融入乡村生态驿站的理念，契合绿色生态发展方向，为乡村振兴和绿色发展注入了新的活力；李瑜^[5]则提出，在农村生活污水资源化利用过程中应遵循因地制宜、以用促治、经济合理、生态安全的原则，并归纳总结出灌溉利用、生态消纳和分散就地利用3种技术模式；郭林睿等^[6]编制了基于全生命周期评价的农村生活污水处理排放清单，并据此对长三角地区4种典型处理工艺进行了碳足迹核算，为“双碳”背景下农村生活污水处理工艺的选择提供了借鉴。

本文结合当前乡镇污水治理现状，分析了收集、处理、施工及运维管理等环节存在的问题，并融合以往的设计、施工和运营的经验，总结出“双碳”背景下的污水处理厂及配套管网设计的优化要点，旨在为乡镇污水处理的低碳节能发展提供参考。

1 乡镇污水处理厂及配套管网存在的问题

我国乡镇污水系统大致可分为3种主要模式：1) 接入城市污水处理厂，适用于地形条件允许且距离城市较近的乡镇；2) 建设镇区污水处理厂，以厂站形式运行，适用于规模较大的乡镇；3) 采用污水一体化设施，以成品设备方式运行，适用于规模较小的乡镇。其中，前两类模式在工艺流程上与城市污水处理厂较为相似，但管理水平相对较低，第三类则属于分散式处理设施，在小型乡镇或村庄应用广泛^[7]。

从目前已建成乡镇污水处理厂的运营情况来看，乡镇污水处理具有明显的独特性，与城市污

水处理存在较大差异，主要面临的问题如下。

(1) 设计阶段盲目借鉴城市污水处理厂的设计理念，追求高标准设计和高成本投入，未充分结合乡镇的人口规模、生活特点及水质特征进行合理规划，导致人均污水指标偏高、进水标准和出水标准设定过高，造成建设规模过大、投资浪费严重。

(2) 乡镇普遍采用雨污合流系统，实现完全分流难度较大。管网设计中普遍存在截污方式不当、混接错接等问题，导致污水处理厂进水污染物浓度偏低；同时，污水水质具有明显季节性波动，使生化系统长期处于低负荷运行状态，活性污泥中的微生物缺乏足够营养，难以发挥应有的生物处理效能。

(3) 乡镇地形复杂，房屋布局凌乱且间距紧密，致使管网敷设困难、收水效果不佳；道路狭窄、纳污面积不足，大量散户污水未能有效收集，整体收集率偏低；南方地区水系发达、地下水位较高，地表水易渗入污水管道系统，进一步降低进水浓度；此外，近年来大规模推广“厕所革命”，基本实现户户建设化粪池，但由于化粪池水流停留时间过长，也导致污水浓度过低。

(4) 乡镇污水处理厂建成后，由于单个厂区处理规模小、污泥产量少，多数项目为节省初期投资未配套建设污泥集中处理与资源化利用设施。设计阶段也未因地制宜制定污泥处理方案，通常采用脱水后运送至垃圾填埋场或垃圾焚烧厂处理，运输成本高昂。

(5) 尾水排放方面未根据当地实际条件考虑回用或深度处理，存在随意排放现象。针对不同的生态环境敏感区域，未实施有针对性设计。如，在环境敏感区或一级饮用水源保护区，应考虑采用人工湿地或深度处理技术对尾水进行处理，以实现水资源的高效回用与生态安全保障。

2 乡镇污水处理厂及配套管网设计优化要点

针对乡镇污水处理的工艺、污泥和尾水资源化利用以及管网敷设的特点，在设计上应从以下几个方面进行考虑：首先，在工艺设计阶段，应重点研究如何选择适合的污水核心工艺处理方案；其次，在总图设计阶段，应注重集约化布置构筑

物,减少占地面积并降低土石方开挖量;再次,在污泥和尾水处理工艺及资源化利用的设计中,应结合当地实际情况,选择运营成本最低且经济效益最优的方案;然后,在管网设计时,应综合考虑提高污水收集率、优化管网敷设方式和改进施工工艺等因素,以最大程度扩大纳污范围;最后,针对不同的建设模式,应采取针对性的设计理念,提升污水处理厂的运营效率、智慧化管理水平,同时节约投资并减少建设用地。

(1) 选定经济性高、操作简便的成熟工艺,优化单体间的组合方式。首先,根据乡镇污水处理规模小、水质水量变化大的特点,采用成熟稳定的厌氧-缺氧-好氧(anaerobic-anoxic-oxic, AAO)及其改良工艺,该工艺具有流程简单、运行稳定、投资及运行费用低等优势^[8-9]。其次,针对不同规模的厂区采用差异化的建设模式:近期规模小于等于1 000 t/d的厂区,采用一体化生化设备(图1)其占地规模小且自动化程度高;近期规模大于1 000 t/d的厂区,则采用更耐久、更常规的土建构筑物单体组合模式,通过将预处理和调节池合建、生化池与消毒及储泥池合建,以及将加药系统、配电间、鼓风机房和办公室等功能合并于同一个建筑单体中(图2),可最大程度减少占地面积。然后,针对不同规模的厂区采用适宜的除臭工艺;小型厂区采用离子除臭工艺,其占地面积小,再结合景观设计选择合理的绿色植物,通过多层次去除臭气,达到良好的处理效果且经济效益显著;大型厂区由于环境敏感且距离居民区较近,采用全过程除臭和集中封闭除臭的方式,并在末端选用运营成本较低的生物除臭工艺,从而最大程度减少对周边居民环境的影响。

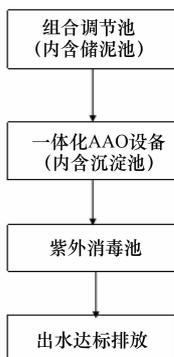


图1 一体化设备工艺流程

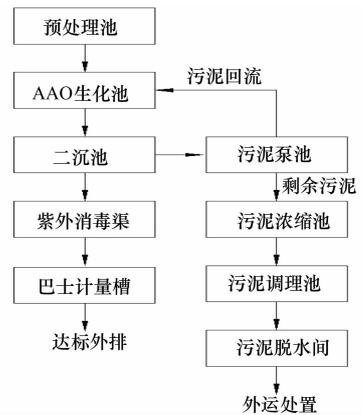


图2 土建构物工艺流程

(2) 优化总图各单体布局,降低开挖量,合理控制竖向尾水排放标高。针对不同场地条件的厂区,采用不同的总图设计方案,合理减少土石方开挖量,节约用地。在工艺布局上力求紧凑集中,从而缩短工艺管线长度;竖向设计时充分考虑处理后的尾水需满足防洪要求,并通过重力流排放至自然水体中。例如,邵阳某乡镇污水处理厂,场地较为平整且位于河道边,厂区地下水位高,下方存在软基。通过将废水一次提升后,核心生化工艺采用地上式构筑物的方式,既减少了软基处理费用和开挖量,又确保出水满足防洪要求,从而有效节约了项目的一次性建设投资和运营费用。再如,衡阳某乡镇污水处理厂因历史原因导致建设用地受限,只能选择小山丘的林地作为厂址。为减少土石方开挖及弃土场建设投资,充分利用厂区自然地势落差,采用分层、分级平台错落布置污水处理单元的方式,成功将土石方量从6万吨减少至两万吨,将边坡由三级边坡简化为一级边坡,大幅降低了防护费用和工程建设难度。

(3) 科学选取预处理工艺,降低后端核心工艺的运行负荷。针对乡镇污水水质水量波动大、规模小的特点,需要在污水处理厂前端设置拦渣、沉砂等预处理措施。在设计上,可将格栅、沉砂池、调节池及污泥池组合成一个综合池体,以节约用地并优化工艺流程。具体而言,污水首先经过格栅拦截,去除大颗粒悬浮物;其次通过平流沉砂池进行沉砂处理,去除一定量的小颗粒砂粒;然后进入调节池实现水质均化和水量调节;最后经水泵提升至生化处理单元。工艺布置平面如图3所示。通过上述预处理及水质水量调节,能够有

效保证生化处理单元的稳定运行。考虑到乡镇厂污泥规模较小，设置 1 座小型污泥储存池即可满足需求。为节约用地，污泥池与预处理系统合建，形成一体化布局。

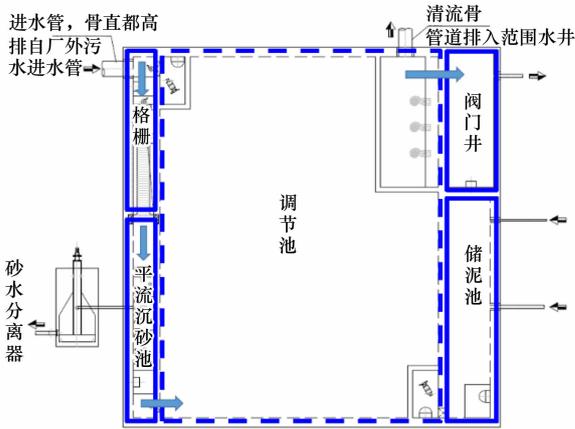


图 3 组合池总体布置

(4) 优化污泥处置的设计思路，采用“分散 + 集中”的模式。各个乡镇污水处理厂产生的污泥量大小不均，且污水处理厂分布分散。如何全盘、经济、合理地考虑污泥的处理方式成为设计中的重点问题。根据常规设计，由于乡镇污水处理厂离城区较远，如果每个厂区单独设置污泥处理系统，这不仅会增加投资成本，还会提高后期运营成本和管理难度。因此，结合各个乡镇污水处理厂的规模及相隔距离的远近，经过综合经济效益对比分析，建议在规模较大的中心乡镇设置污泥集中处置系统。周边附近的乡镇污水处理厂污泥可定期通过移动式的污泥脱水车运输至中心乡镇进行集中处理，具体布置方案如表 1 所示。这种方式不仅能够减少污泥系统的建设投资，还能节约大部分厂区的建设用地，并且在综合效益对比后可大幅度降低整个污泥系统的运营成本。

表 1 “分散 + 集中”的模式方案布置

乡镇名称	近期设计污水处理规模/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	污泥处置方案	离中心镇的平均距离/km	离城区的平均距离/km
中心镇 1	6 100	建设污泥集中脱水系统,以确保污泥含水量低于 60%。对于其余 5 个乡镇,则采用移动脱水设备将污泥脱水至含水量 80% 后,再运送至中心镇 1 进行处理。	15	50
中心镇 2	6 200	建设污泥集中脱水系统,以确保污泥含水量低于 60%。对于其余 6 个乡镇,则采用移动脱水设备将污泥脱水至含水量 80% 后,再运送至中心镇 2 进行处理。	16	30

根据生活污泥含水率需处理至低于 60% 的技术要求，考虑到乡镇污水处理厂厂区用地紧张、污泥处理规模小的情况，为减少土建处理池的使用，可采用机械化程度更高的设备组合工艺（即调理罐 + 机械浓缩一体机 + 板框压滤的组合工艺）。该工艺具有占地小、自动化控制率高且操作简单的特点。

(5) 优化管网设计路径，选用适宜的施工工艺。在设计区域内的总平面图上，正确定线是经济合理地设计污水管道系统的先决条件，也是设计的重要环节^[10]。管道平面布置的走向应遵循的主要设计原则：尽可能缩短管线长度、减少埋深，使尽可能多的纳污区域污水能够通过重力流进入污水处理厂，尽量避免或减少提升泵站的设置，从而节约投资和运营费用。

针对乡镇污水管网上位规划指导性较弱，街道狭窄、建筑布置不规律且基础薄弱、地形地势复杂、协调难度大、占用农田及河道等特点，首先需联合乡镇政府和村委组成调查组，全面摸清排水现状和管网情况，并对设计管网方案进行多次汇报与意见征集，确保方案的可实施性。其次，结合污水系统近期与远期需求，因地制宜地规划污水管道走向。根据房屋现状排水特点优化管道埋深，尽量降低开挖对周边房屋和道路交通的影响。例如，在乡镇主要道路两侧房屋整齐分布且排水方式基本统一的情况下，可在道路下敷设管道，通过预留管将污水接入主管；对于支路上房屋杂乱无序、道路狭窄的情况，可通过浅埋接户管将污水接入主管；若屋前屋后存在地势高差，常规排水通常位于屋后低洼处，则可将管道埋设于屋后，并在标高合适的位置将屋后管道接入乡镇主要道路下的污水主管中，具体方案如图 4 所

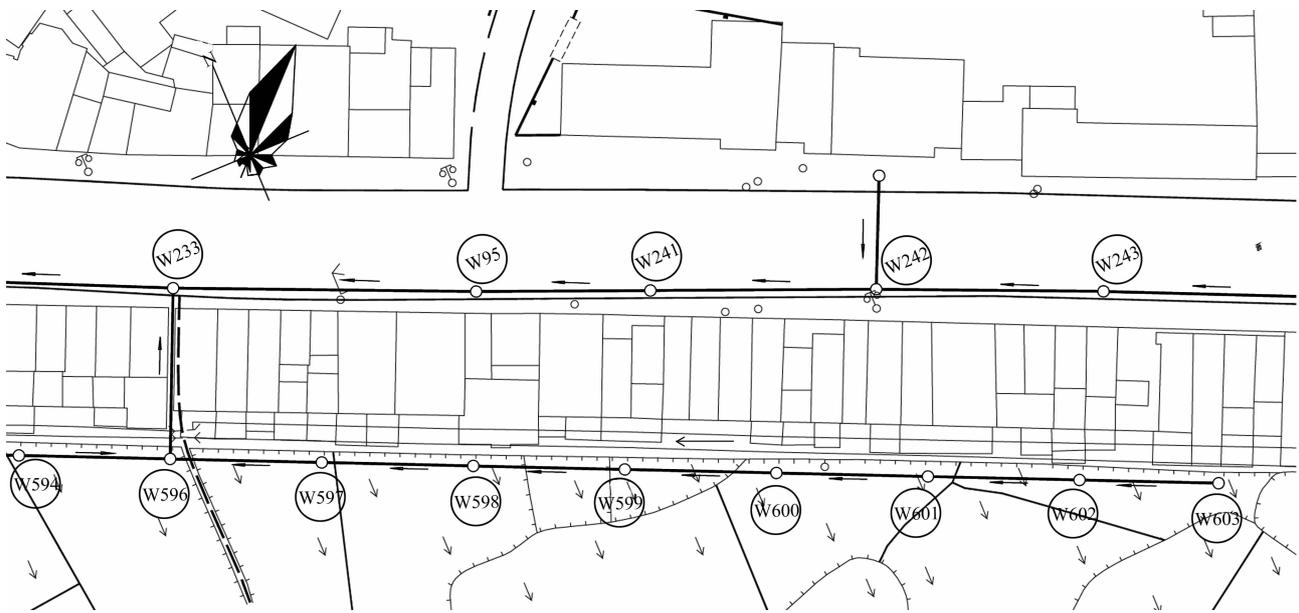


图 4 屋前主管和屋后支管接入管的平面布置

示。此外，预留支管的设计不应照搬城市管网模式，而应综合考虑乡镇道路、房屋布置情况、支路走向以及排污大户的位置，间隔一定距离设置预留支管，以适应乡镇布局的无规律性和杂乱性。

然后，根据不同管段的地质条件和施工条件，合理选择顶管、拉管、放坡开挖等不同的施工工艺，从而实现造价的合理节约。最后，乡镇污水管道管径较小，检查井多为圆形检查井，因此建议选用 HDPE 新型塑料管材、预制钢筋混凝土检查井以及塑料井（作为预留井）。这些材料具有施工快捷、工期短、防腐性能好等优势。在遇到跨越河道、渠道或需要设置压力管道的情况时，可选用金属管道以满足特殊要求。具体过河方式如图 5 所示。

(6) 不同区域采用不同的尾水排放方式。不同区域对水环境的要求各不相同，因此尾水排放的设计也应有所不同。例如，在湖南洞庭湖区域，总磷控制是重点要求。乡镇污水处理厂在常规二级生化

处理的基础上，需要增加深度处理工艺，以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918—2002）中的一级 A 标排放标准。此外，在尾水排入水系之前，可设置 1 套人工湿地系统作为进一步处理手段。

人工湿地是一种通过建设水池或水槽作为水处理构筑物的工艺。其底部铺设防渗漏隔水层，并充填足够厚度的基质层用于种植水生植物。其工作原理是利用基质层、植物及微生物的物理、化学及生物三重协同作用来净化污水。人工湿地适合作为尾水排放前的处理工艺。在设计时，应结合当地土地条件，充分利用土地资源，构建满足排水要求的人工湿地系统。这样不仅可以减少污染物的排放，还能避免过多增加处理系统的能耗负担。

(7) PPP 项目模式下的全生命周期设计理念的探究。PPP 模式是一种设计、建设、运营一体化的工程模式，不仅要考虑初期建设投入的成本，

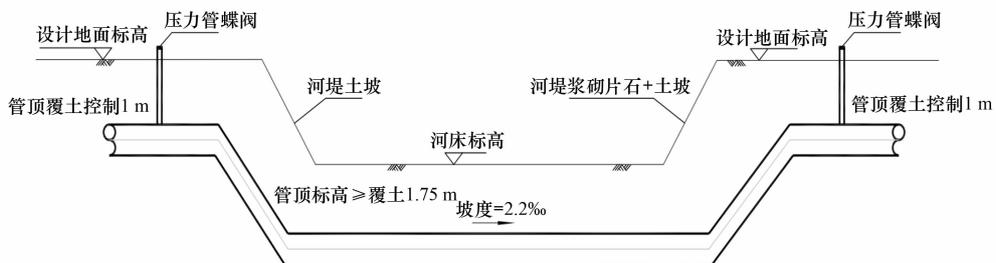


图 5 压力管道过河

还要兼顾后期运营和维护的成本，从而确保项目的投资回报率。PPP模式能够很好地践行“全生命周期成本”理念，具体表现如下。

1) 提前介入优势：设计单位可从社会经济、环境、文化等建设背景及政策条件等层面，提前参与项目立项和规划。通过全方位考量项目建设成本和运营成本，最大程度配合主要投资方进行项目决策。

2) 设计标准化优势：乡镇污水PPP项目通常涉及多个乡镇污水处理厂打包建设，厂区设计可从预处理、核心生化工艺、污泥处理、除臭处理等核心环节统一标准，仅根据处理规模调整各部分尺寸。这不仅提高了后期运营的便捷性，还有效节约了运营成本。

3) 建设和运营一体化：通过统一设计标准，便于施工、设备采购批量化和标准化，实现运营一体化。这一模式解决了传统模式中设计、施工和运营各自为政的问题，最大限度提升了项目的运营水平和盈利能力。

4) 智慧水务建设：PPP项目通常涵盖多个污水处理厂及其配套管网、泵站建设。同步建设智能自控系统、设备联动、远程监控和在线监测设备，实现全流程智慧控制，使泵站和厂区具备无人值守能力。

5) 污泥资源化综合利用：多个厂区可采用“分散+集中”的模式，将污泥集中至某个厂区进行处置和资源化利用。这种方式不仅节约了设备投资，还提高了运营效率。

3 结论

乡镇污水处理厂及配套管网的设计与城市污水处理厂及配套管网的设计存在较大差异。鉴于乡镇污水来源分散、水质水量变化大、厂址选址不合理、管网敷设复杂等特点，本文从以下几个方面提出了设计优化的要点：预处理工艺的选择、总图的平面和竖向布置、工艺及单体的优化组合、

污泥“分散+集中”的处理模式、管网路由和施工工艺、尾水排放方式和PPP模式下全生命周期设计理念的应用。这些优化要点尤其适用于山地丘陵地区，这类地区地势起伏较大、建筑呈线型布局、房屋间隔紧密且建设用地紧张，是典型的南方乡镇特征。因此，在进行乡镇污水处理厂及配套管网的设计时，应因地制宜，充分结合当地的经济状况和实际实施条件，制定投资合理、运营费用低的设计方案，从而确保项目的顺利推进。

参考文献：

- [1] 宋新新,刘杰,林甲,等. 碳中和时代下我国能量自给型污水处理厂发展方向及工程实践[J]. 环境科学, 2022,42(4):53-63.
- [2] 唐娇娇,谢军祥,陈重军,等. 城镇污水处理厂碳中和技术及案例[J]. 化工进展,2022,41(5):2662-2671.
- [3] 王波,何军,车璐璐,等. 农村生活污水资源利用:进展、困境与路径[J]. 农业资源与环境学报,2023,40(5):1255-1264.
- [4] 王慧芳,杨传忠,张勇,等. 以乡村生态驿站为基础的低碳氮比村镇生活污水处理典型案例[J]. 环境生态学,2023,5(6):105-110.
- [5] 李瑜. 农村生活污水资源化利用技术模式及工程示范[J]. 净水技术,2024,43(2):83-89;96.
- [6] 郭林睿,顾佳艳,何国富,等. 基于碳足迹核算的农村生活污水处理工艺比选[J]. 环境工程技术学报, 2025,15(2):454-464.
- [7] 杜嘉丹,谢磊,田小波,等. 城乡融合发展下乡镇污水系统问题及对策建议:以南方某丘陵城市为例[J]. 给水排水,2022,58(增刊1):6-10;16.
- [8] 郝晓地,李天宇,吴远远,等. A²/O工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. 中国给水排水, 2017,33(21):18-24.
- [9] 刘新超,贾磊,俞勤,等. AAO工艺在不同HRT和回流比条件下对实际污水的处理效果[J]. 环境工程, 2017,35(1):51-54.
- [10] 王涛. 既有乡镇污水管网工程设计经验与体会[J]. 工程建设,2020,52(6):49-54.