

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.010

洛阳某大型污水厂不停水原位提标改造工艺设计

石兰兰, 安莹玉, 刘伟岩, 王文啸, 秦栽根, 刘宇心
(北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100020)

摘要: 洛阳市某污水处理厂原设计规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 分两期建成, 原出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准。为响应项目所在地的出水提标要求, 在满足建设期不停水、不降低处理水量与原有排放标准、不新增征地的 4 项限制条件下, 尽可能利旧, 对一期 MBBR 生化工艺和二期两级 AO 生化工艺进行改造。通过新建部分生物池及优化功能分区布局, 实现了出水中有机物、氨氮、总氮、总磷的标准提升。同时, 通过合理利用站内有限地块、低影响施工、分步改造实施等措施, 保证改造期间不影响污水厂正常生产。项目建成至今, 出水水质稳定达到《河南省黄河流域水污染物排放标准》(DB 41/2087—2021) 一级标准, 对同类项目具有一定的借鉴意义。

关键词: 污水处理厂; 原位提标; 改造; 利旧; 生化工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0066-06

Process Design for In-situ Upgrading and Renovating of a Large-scale Sewage Treatment Plant in Luoyang with Uninterrupted Wastewater Treatment

SHI Lan-lan, AN Ying-yu, LIU Wei-yan, WANG Wen-xiao, QIN Zai-gen,
LIU Yu-xin

(Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing 100020, China)

Abstract: The original designed capacity of a sewage treatment plant in Luoyang was $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and its construction was completed in two phases. The original effluent quality met the first level A limit specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). To meet the requirement for improving effluent quality at the project site, the first-phase MBBR biochemical process and the second-phase two-stage AO biochemical process were renovated to the greatest extent possible to maximize the utilization of existing infrastructure under the constraints of maintaining uninterrupted wastewater treatment during construction, preserving the original treatment capacity and discharge standard, and avoiding new land acquisition. New biological tanks were constructed and the functional zoning layout was optimized to enhance the removal efficiencies of organic matter, ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus in the effluent. Meanwhile, the normal operation of the sewage treatment plant remained unaffected during the renovation period by implementing measures such as the rational utilization of limited plots within the facility, low-impact construction, and phased renovation. Since the project's completion, the effluent quality has consistently met the first level limit specified in *Water Pollutant Discharge Standards for the Yellow River Basin in Henan Province* (DB 41/2087—2021), providing a valuable reference for similar projects.

Key words: sewage treatment plant; in-situ upgrading; renovating; utilization of existing

infrastructure; biochemical process

洛阳市某污水处理厂位于洛河沿岸,总占地面积约 17 hm²,总建设规模 30×10⁴ m³/d,分两期建设。其中一期始建于 1998 年,设计规模 20×10⁴ m³/d,生化处理采用 AAO 工艺,运行初期执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准,2012 年启动一级 A 提标改造,增设网格沉淀池+转盘滤池深度处理工艺并在生物池加装 MBBR 填料。2014 年启动二期扩建工程,设计规模 10×10⁴ m³/d,采用强化脱氮改良型两级 AO+深度混凝沉淀过滤工艺,出水水质执行 GB 18918—2002 一级 A 标准,达标后尾水排入洛河支流中州渠。

为改善黄河流域水环境质量,河南省生态环境厅于 2021 年 1 月发布《河南省黄河流域水污染物排放标准》(DB 41/2087—2021),要求排污单位污水排入黄河干流、黄河一级支流和涉及Ⅲ类水功能区的其他水体时,执行一级标准,其中化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷及总氮 5 项主要指标的排放限值比国家标准更为严格。

该项目尾水排放至黄河支流,按环保政策要求,于 2021 年初启动提标改造工程。为避免工程建设期间影响区域生态,要求不能停水、改造期不能降低处理水量与原有排放标准,且厂区位于城市核心区域,周边发展已趋于成熟,无额外可利用征地,该工程需在厂站现有红线内实施。同时,提标方案需尽量降低对现有系统运行的影响,多项限制因素叠加导致工程实施难度加大。工程设计建设期 2 年,至 2024 年提标工程已顺利投产转商运,出水各项指标均能稳定达到 DB 41/2087—2021 中一级标准。

1 原有工程概况

1.1 工艺流程及出水标准

原工艺流程见图 1。

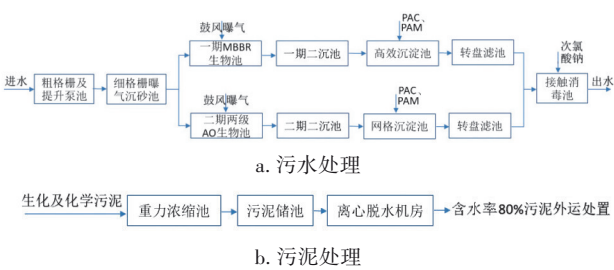


图1 原工艺流程

Fig.1 Original process flow chart

区域收集污水经厂外泵站提升至规模为 30×10⁴ m³/d 的预理工段,沉砂池出水按比例分配至一、二期生物池,各自经生化处理、二次沉淀、混凝沉淀过滤后出水汇合至接触消毒池,达标后排放水体。原排放标准为 GB 18918—2002 的一级 A 标准。

1.2 实际水质分析

该项目收水区域稳定,近年来实际处理水量已接近满负荷,年均运行水量为 27×10⁴ m³/d。工程原设计进水水质为常规市政污水中等浓度,而实际进水工业废水占比约 40%,主要为机加工、食品加工废水,水质具有波动性。工程原设计及实际进、出水水质见表 1。

表1 原设计及实际进、出水水质
Tab.1 Original design and actual influent and effluent quality mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
原设计进水	380	200	300	45	35	5
原设计出水	≤50	≤10	≤10	≤15	≤5(8)	≤0.5
2020 年—2021 年 90% 概率进水	380	190	340	52	42	6.5
2020 年—2021 年 90% 概率出水	47	8	8.6	14.5	4.8	0.46

2020 年—2021 年实际 90% 概率进水中 SS、TN、NH₃-N、TP 四项指标均已超出原设计进水标准。受进水水质影响,实际 90% 概率出水中各指标虽可达标,但有机物、总氮、总磷已极为接近标准限值。原工艺系统冗余能力有限,导致项目运营难度增大,同时该污水厂亦承受一定的环保考核压力。

2 现状工艺运行问题

两期工程受前后建设顺序及出水水质标准演变影响,分别建设不同的生化处理工艺。

① 一期生化问题分析

一期生物池始建于 1998 年,设计规模 20×10⁴ m³/d,早期按一级 B 标准设计,采用 AAO 工艺,总停留时间仅为 7.86 h,其中厌氧区 0.87 h、缺氧区 1.42 h、好氧区 5.57 h,3 组功能区均采用循环沟道池型。2012 年启动一级 A 提标改造,在生化好氧区加装 MBBR 填料,填充比约 30%,同时将内回流比增至 350%。因实际进水浓度高于原设计进水标准,为减轻各功能区停留时间不足的影响,一期生物池

以高污泥浓度(6~7 g/L)常态运行,泥龄过长导致污泥老化,反应效率降低,同时为保证反硝化效果,好氧池以低氧曝气模式运行,系统氨氮、总氮达标压力骤增。

为维持生物池高污泥浓度运行,后端二沉池固体负荷升高,沉淀池出水水质恶化,冬季沉淀区频繁出现污泥膨胀现象。此外,受生物除磷及二沉效果不佳影响,深度处理高效沉淀及转盘滤池工艺进水中悬浮物及总磷指标升高,除磷药剂成本居高不下,滤池反冲洗频繁,滤布堵塞率、破损率均较高。

② 二期生化问题分析

二期生物池建设于2014年,设计规模 10×10^4 m³/d,采用两级AO工艺,生物池总停留时间为16.2 h,其中预缺氧区1.0 h,厌氧区1.4 h,一级缺氧区2.3 h,一级好氧区2.3 h,二级缺氧区2.3 h,二级好氧区6.9 h,内回流比400%。

进水工况相同时,二期生化效果明显优于一期,但因一、二级缺氧池设计停留时间相同,且一级好氧区停留时间较短,导致一级生化段硝化、反硝化反应不充分,碳源未被充分利用,外加碳源成本较高,且缺氧、好氧功能区的紧密转换加大对溶解氧的控制难度,弱化脱氮效果,内回流比亦难以降低,未能充分发挥两级AO工艺的处理优势。

上述问题限制了主工艺的提升空间,面对黄河流域一级标准的出水提标要求,需在科学测算的基础上,除对现有生化单元进行挖潜增效外,必要时还应针对重、难点污染物削减指标新建功能区,优化系统设计,提高工艺流程的污染物去除效率。

3 提标工程思路

提标工程设计进、出水水质见表2。

表2 设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
进水/(mg·L ⁻¹)	400	200	350	55	45	7
出水/(mg·L ⁻¹)	≤40	≤6	≤10	≤12	≤3(5)	≤0.4
去除率/%	90	97	97	78	93	94

该提标工程综合污水处理厂现有用地情况、现状系统运行能力评估、实际水质变化趋势、商务诉求以及污水排入城镇下水道水质标准要求,在原设计基础上适当提高进水浓度,接近2020年—2021年稳定运行的实际进水浓度。出水水质执行DB 41/

2087—2021中一级标准。

3.1 重点污染指标分析

与原一级A标准相比,提标后的出水标准对有机物、总氮、氨氮、总磷指标要求更为严格。

相较于原出水标准,出水COD和BOD₅浓度需分别降低20%、40%。分析实际水质可知,进厂污水可生化性较好,易被生物降解。这是由于虽然进水中工业废水占比约40%,但其中难降解有机物较少,加之区域环保监管日趋严格,企业排污浓度较为稳定。综合现状实际出水水质判断,有机物并非提标工程的重点处理指标。

出水SS限值未做调整,仍为10 mg/L,工程现有深度处理工艺即可满足要求。出水TP由原0.5 mg/L下调至0.4 mg/L,实际进水BOD₅/TP介于11.5~49.7之间,均值为23.5,生物除磷功能较强。根据经验,在强化生物除磷功能的同时,适当提高深度处理工段除磷药剂投加量,出水TP即可达标。此两项亦非工程重难点处理指标。

出水TN由原15 mg/L下调至12 mg/L,出水NH₃-N由原5(8) mg/L下调至3(5) mg/L,分别下降20%及40%。而此两项进水浓度较原设计分别提升10 mg/L,对系统脱氮要求更为严苛。实际进水BOD₅/TN介于1.89~4.74之间,均值为2.88,碳源略有不足。由实际运行情况可知,当进水水质接近设计边界时,出水指标较提标限值尚存较大降幅需求。而一、二期生化工艺各自存有配置缺陷,经科学测算,在现有条件下无法仅靠运营手段实现总氮提标,故总氮、氨氮为该工程的重点提升指标。

3.2 总体实施路线

基于工程现有工艺流程,脱氮功能全部集中于二级生化处理工段,深度处理并无额外分担工艺。在厂区可用地块极为有限、其他指标并无同等提升难度的情况下,面临不能停水、不能降低处理水量与原有排放标准的限制要求,需充分利用现有生化及深度处理工艺,减小改造、新建工程范围,尽可能降低提标工程对厂区运营的影响^[1]。同时,借助提标契机还应充分优化生化系统设计布局,提升生物池处理能力,降低一期二沉、深度处理工段污染物负荷,推动污水处理系统恢复高效稳定、可持续且具备合理韧性的运行状态。

综上,该项目提标路线明确为对现有预处理、深度处理及污泥处理系统利旧,仅对两期二级生化

系统加以改造并新建必要生化处理区。

3.3 生化改造方案

针对一期生物池各功能区停留时间严重不足的问题,首先对现有池容进行反向校核,通过科学计算核定其在达标保障下的最大处理能力,按此降低其运行规模^[2],剩余缺口规模利用厂区闲置空间新建高效脱氮生物反应池。对于现状一期厌氧区容积不足,占比不合理,限制单元除磷脱氮能力的问题,通过调整内回流入口位置,将现有厌氧区置换为缺氧区,增大功能容积^[3-4],在生物池进水上方地块新建 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模的厌氧区,进水端增加配水区,利用现有水头余量实现水量的二次分配。

故一期生化提标方案明确为“核减现状生物池运行规模+新建缺口规模生物池/功能区”。该方案建设期间对现有系统的运行并不构成影响,无须增设水力提升系统,构筑物建成后采用不停水接口切换措施,实现新建系统与已有系统的节点联通与单元融合。

一期生物池提标改造前后工艺流程见图2。

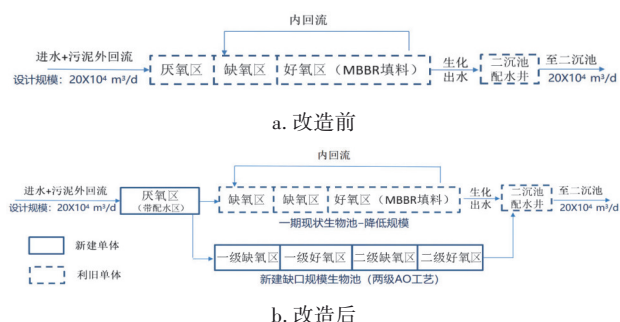
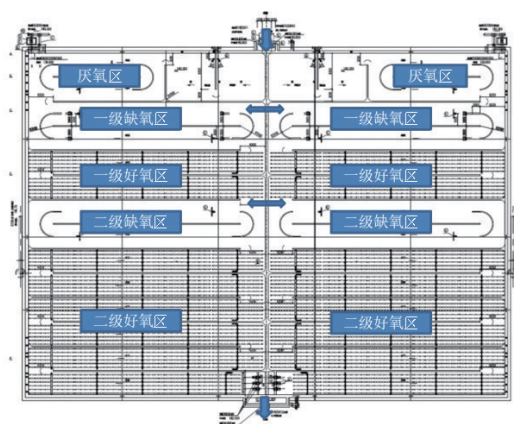


图2 一期生物池提标改造前后工艺流程

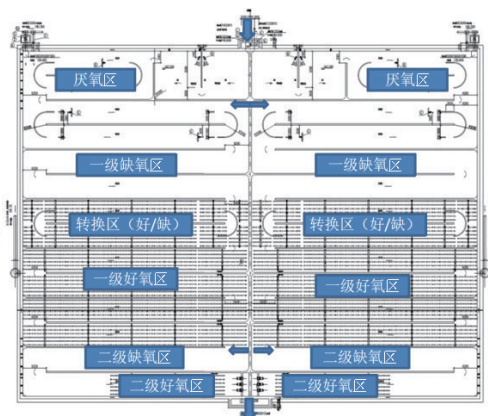
Fig.2 Process flow charts of biological tank before and after upgrading and renovating in the first phase

针对二期生物池总停留时间充足但功能分区不合理的问题,考虑于旱季低水量运营期采用分格轮换改造方式,通过调整底部曝气器及搅拌器的安装位置重新分区、增加功能转换区、变更配套分进水口及回流点位置等措施优化功能区布局,提升二期生化系统脱氮除磷能力^[5]。二期生物池提标改造前后布置方案见图3。

两套生化改造方案在满足提标工程处理标准的前提下,充分利用现有水力高程和可拆除置换用地,兼具管线衔接便利的特点,实现了低影响、低投资、高环境效益的工程目标。



a. 改造前



b. 改造后

图3 二期生物池提标改造前后布置方案

Fig.3 Layout of biological tank before and after upgrading and renovating in the second phase

4 生物池改造工艺设计

① 现状一期生物池

现状一期生物池核减后的运行规模为 $15.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计污泥浓度 5 g/L ,缺氧区停留时间增至 3 h ,好氧区(MBBR填料)停留时间 7.1 h ,加之新建停留时间 1.5 h 的厌氧区,生化池总停留时间增至 11.6 h 。

② 新建一期生物池

利用厂区东侧围墙沿线 5260 m^2 绿化带实施新建工程,设计规模 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平面尺寸 $211.0 \text{ m} \times 16.5 \text{ m}$,有效水深 6.8 m ,设计污泥浓度 5 g/L ,一级缺氧区、一级好氧区、二级缺氧区、二级好氧区的停留时间分别为 3.8 、 5.9 、 1.5 、 0.5 h ,叠加新建 1.5 h 停留时间的厌氧区,合计生化池总停留时间为 13.2 h 。因建设位置邻近二期生物池,且风压一致,故利用二期鼓风机余量可满足曝气需求。单体设置3台

立轴搅拌器, $N=2.2\text{ kW}$; 2台潜水推流器, $N=5.7\text{ kW}$; 4台混合液回流穿墙泵, 单台 $Q=1\,875\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=12\text{ kPa}$ 、 $N=25\text{ kW}$; 最大内回流比为300%。

③ 新建一期厌氧区

拆除一期生物池上方的低利用率厂房后新建一期厌氧区, 设计规模 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 平面尺寸 $71.0\text{ m}\times 26.0\text{ m}$, 设计污泥浓度 5 g/L , 进水堰分配水量至系列1 ($15.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$) 及系列2 ($4.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$), 停留时间 1.5 h 。单体设置2台立式搅拌器, $N=3\text{ kW}$; 4台低速潜水推流器, $N=4.5\text{ kW}$ 。

④ 改造二期生物池

二期生物池设计规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 污泥浓度 4 g/L , 总停留时间为 16.2 h 。优化分区后, 预缺氧区、厌氧区、一级缺氧区、一级好氧区、二级缺氧区、二级好氧区的停留时间分别为 1.0 、 1.4 、 4.6 、 6.9 、 1.8 、 0.5 h 。按巴顿甫工艺调整搅拌器及曝气器安装位置, 并设置好/缺氧可变功能区灵活运行, 同步调整二级缺氧区的原水进水点及内回流泵设计位置, 采用单格轮换改造方式降低运维影响。改造工程增设26台立轴搅拌器, $N=1.5\text{ kW}$ 。

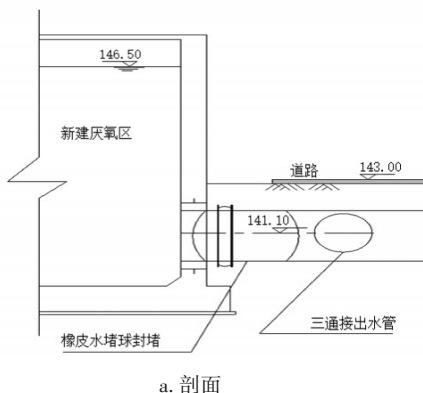
⑤ 新建应急活性炭投加系统

以去除 5 mg/L 难降解 COD 为目标, 新建应急活性炭投加系统, 粉末活性炭投加量 30 mg/L , 配套设置2套石灰投加系统。

5 不停水施工措施

为降低改造期对污水厂运行的影响, 采用气囊封堵、外接转换井及钢结构止水等措施, 确保不停水施工, 有效降低提标改造工程的施工难度。

通过气囊封堵使原管道停水, 方便管道路由改造、井体增设或更换阀门。利用气囊充、放气发挥止水及通水作用, 具有安装拆卸便利、对管道无损坏等优点。气囊封堵剖面示意及现场照片见图4。



a. 剖面



b. 现场照片

图4 气囊封堵剖面示意及现场照片

Fig.4 Cross-section diagram and scene photo of airbag blocking construction

对于新建管线与现有池体的接驳方式, 采用转换井及钢结构止水的专项施工方案, 渗水量可控制为 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 。

6 实际运行效果

该提标工程已于2023年7月转商运, 工程总投资1.30亿元, 吨水提标投资 $430\text{ 元}/\text{m}^3$, 新增直接运行成本约 $0.04\text{ 元}/\text{m}^3$ 。截至2024年2月底, 该厂实际运行过程中的进、出水水质如表3所示。

表3 实际进、出水水质

Tab.3 Actual influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
设计进水/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	400	200	350	55	45	7
2023年8月—2024年2月 95% 概率进水/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	468	204	240	59	45	8
设计出水/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 40	≤ 6	≤ 10	≤ 12	$\leq 3(5)$	≤ 0.4
2023年8月—2024年2月 95% 概率出水/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	27	5.2	3	10	1.3	0.3
实际去除率/%	94	97	99	83	97	96

经实际数据分析可知, 该提标工程在核心指标接近或超过设计进水边界时, 出水各项指标均可稳定达标, 实现了预期目标。

7 结论

① 对于提标改造类项目应按照水量水质分析、已建设施运营工况调研、核心参数复核、运营提效空间评估及方案制订的5项步骤开展工作。结合实际及设计进、出水水质边界复核构筑物处理能力及相关提升指标, 梳理提标改造的重点、难点。

② 生化系统的挖潜增效对有机物、总氮、总

磷指标提升贡献较大,通过优化功能分区、调整内回流点位、多点进水、设置好/缺氧转变区、提升曝气效率等方式可强化脱氮除磷效果。

③ 有限用地项目可充分利用废弃厂房翻建、改建功能单体,或在不规则地块因地制宜地设计匹配池型,充分利用厂内空间,优化总平面布局。

④ 提标方案应尽可能降低对现有系统的运营影响,可采用先新建引流、后分格改造旧系统的方式分步实施工程,甄选适合的不停水施工方案,避免停水、降低标准等问题。

参考文献:

- [1] 顾雪锋,吴鹏. 污水厂不停水应急达标改造工程设计及实施[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6): 103-107.
GU Xuefeng, WU Peng. Design and construction of emergency plan for compliance of new effluent criteria under normal operation[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(6): 103-107 (in Chinese).
- [2] 张彪. 海滨污水厂提标改造工程水处理工艺设计[J]. 净水技术, 2020, 39(12): 19-24, 68.
ZHANG Biao. Design of wastewater treatment process for upgrading and reconstruction project of Haibin WWTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(12): 19-24, 68 (in Chinese).
- [3] 姚瑞珍,周国胜,杨新春,等. 基于A²/O工艺污水厂改造与提标工程设计[J]. 水处理技术, 2024, 50(2): 148-152.
YAO Ruizhen, ZHOU Guosheng, YANG Xinchun, et al. Design of sewage plant reconstruction and upgrading project based on the A²/O process [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(2): 148-152 (in Chinese).
- [4] 陈黎明,周林凡,林文辉,等. 污水处理厂原位扩容提标设计实例[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(5): 79-83.
CHEN Liming, ZHOU Linfan, LIN Wenhui, et al. Design of in-situ expansion and upgrading reconstruction of sewage treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2023, 54(5): 79-83 (in Chinese).
- [5] 王怡文,黄天寅,曹强,等. 苏州市某污水厂不停水提标挖潜改造工程实例[J]. 水处理技术, 2022, 48(4): 145-148, 153.
WANG Yiwen, HUANG Tianyin, CAO Qiang, et al. Project case of upgrading reconstruction of a sewage treatment plant in Suzhou without wastewater stoppage [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(4): 145-148, 153 (in Chinese).

作者简介:石兰兰(1981-),女,北京人,本科,高级工程师,主要从事市政给水、污水厂和配套管网工艺设计及水务项目的运营技术管控工作。

E-mail: shilanlan@bewg.net.cn

收稿日期:2024-03-20

修回日期:2024-04-28

(编辑:沈靖怡)

优化国土空间开发保护格局,
加强生态环境分区管控