

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 17. 001

典型丘陵地区污水系统运行效能评估与碳源损失解析

钟妮倩¹, 李一平¹, 周玉璇¹, 潘泓哲¹, 杨紫瑄¹, 赵思索¹,
胡琳², 尤爱菊²

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利河口研究院<浙江省海洋规划设计研究院>, 浙江 杭州 310020)

摘要: 外水入侵稀释、污染物物理沉降与生化降解是污水系统输送沿程碳源损失的关键原因。以华东城市典型丘陵地区分流制污水系统为例,开展源头排水户-污水管网-提升泵站水量和水质同步监测,探究管网水力特性及水质变化响应,诊断系统运行问题,量化沿程物理稀释与沉降/降解比例。结果表明,系统实测污水量为理论值的1.93倍,外水入侵严重,地块出水至泵站进水碳源衰减比例(以COD计)为32.6%。上下游排水分区运行特征存在显著差异,其中上游管段接近满管运行,部分管道出现压力流,68.6%的管网流速<0.30 m/s, COD/氨氮低于下游;下游平均充满度为0.57, COD/氨氮逐渐降低。因丘陵地势复杂,上游管网坡度符合设计标准但落差大,排水不畅,导致高水位和颗粒物沉降;下游地势低,外水入渗稀释污染物。典型低水量低负荷效能区碳源损失机制以沉降/降解为主,占74.67%;高水量高负荷效能区以外水稀释为主,占94.24%。

关键词: 丘陵地区; 污水系统; 外水入流入渗; 碳源损失; 提质增效

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0001-08

Evaluation of Operation Efficiency and Quantitative Analysis of Carbon Sources Loss in Sewage Systems in Typical Hilly Area

ZHONG Ni-qian¹, LI Yi-ping¹, ZHOU Yu-xuan¹, PAN Hong-zhe¹, YANG Zi-xuan¹,
ZHAO Si-suo¹, HU Lin², YOU Ai-ju²

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary <Zhejiang Institute of Marine Planning and Design>, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The dilution by infiltration of external water and the deposition and degradation of pollutants are the key reasons for the loss of carbon sources in sewage systems. Taking a separate sewage system in the East China hilly area as an example, the simultaneous monitoring of water quantity and quality in the source drainage households, sewage pipe network and pump station was carried out. The study aimed to explore the hydraulic characteristics and response of water quality changes in the pipeline network, diagnose operational issues in the system and quantify the proportion of physical dilution,

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22_0176); 国家重点研发计划项目(2023YFC3208900、2023YFC3208904); 国家自然科学基金资助项目(52039003)

通信作者: 李一平 E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

settling and degradation along the process. The results showed that the measured sewage volume of the system was 1.93 times of the theoretical value, indicating severe external water infiltration. The proportion of carbon source attenuation (measured by COD) from the discharged water to the pump station was 32.6%. Significant differences were observed in the operational characteristics of the upper and lower drainage zones. The upper pipeline was running close to full capacity, with some pipelines experiencing pressure flow, 68.6% of the network flow velocity was lower than 0.30 m/s and COD/NH₃-N was lower than the downstream. In the downstream area, the average filling degree was 0.57 and COD/ NH₃-N gradually decreased. Due to the complex terrain in the hilly area, the slope of the upper pipeline met the design standards but had a large drop, leading to poor drainage, high water levels and particle settling. In the downstream area with lower terrain, external water infiltration diluted pollutants. The carbon source loss mechanism in the typical low water volume and low load efficiency zone was mainly dominated by deposition and degradation, accounting for 74.67%, while in the high water volume high load efficiency zone, external water dilution was the main mechanism, accounting for 94.24%.

Key words: hilly area; sewage system; external water inflow and infiltration; carbon sources loss; quality and efficiency improvement

我国城镇污水处理能力快速增长,根据《2022年中国城市建设状况公报》城镇污水处理率高达98.1%,但生活污水集中收集率仅有70%,全国37.5%的污水处理厂进厂COD不足150 mg/L^[1]。反硝化碳源不足会导致污水厂生物处理效能降低,增加污水处理成本,亟需探明污染物在系统中的衰减,明确污水系统问题,精准开展提质增效工作。

已有研究表明,悬浮污染物发生沉积^[2]以及微生物降解污水中部分污染物^[3]是管网水质变化的关键原因。Ozer等^[4]构建了3 m长管道开展室内模拟实验,发现管壁生物膜对有机物的去除贡献突出;桑浪涛等^[5]、金鹏康等^[6]通过研究量化了管道沉积、微生物降解及冲刷释放在污染物迁移过程中的占比。而在实际工况中,除管网内部污染物衰减外,许多地区外水入渗比例达42%~66%^[7],显著降低进水污染物浓度。周宇等^[8]基于长序列数据,考虑外水量后计算污水厂范围内BOD₅因沉降、降解导致的损失率为64%。然而,现有研究缺少对沿程不同分区管网水力工况以及水质衰减中外水稀释作用、污染物沉降/降解作用的量化分析。另外,关于提质增效的研究多聚焦于雨量充沛而且地势平坦的南方地区^[9-11],缺少对于地势起伏较大的丘陵地区的研究。

为此,以丘陵地区分流制污水管网区域为例,分层级建立多点水量在线监测体系,获取高频污水

管网液位、流速、流量等水力指标,结合人工水质监测结果评估系统效能,掌握实际污水管网水量、水质变化规律,量化污水系统中外来水稀释和污染物自身降解的贡献,明确系统碳源不足的原因,从而进一步优化调控系统末端进水水质。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

以华东某市污水泵站(以下简称A泵站)服务范围研究对象,总面积为8.9 km²,排水体制为分流制,污水管网总长度为40.7 km,有3条市政干管汇入泵站,埋深约4~8 m。泵站收集生活污水,服务范围主要用地类型为居民区、行政区和商业区。泵站规划污水总量为3.6×10⁴ m³/d,2022年实际污水量为(2.7~6.2)×10⁴ m³/d。该区域属亚热带季风气候,降雨丰沛,地势起伏较大,东南高、西北低,最大高程约50 m,最小高程约9 m。地下水稳定水位埋深在0.30~2.58 m,最高水位一般在7、8月份。

1.2 监测与采样

1.2.1 监测点布置

以污水泵站服务区污水干管和支管汇流点为节点,将污水泵站服务范围划分为10个片区,详见图1。监测点位于污水片区末端、支管汇流后,共12个节点,除3、4、7、8为污水支管监测点,其余节点均位于市政干管。水量监测使用流量液位监测仪,监测频率为5 min一次,监测时间为30 d。水质采样基

于居民生活用水习惯及干管水质变化规律^[12-13],尽可能涵盖污水管网排水高低峰,于03:00—04:00、08:00—09:00、12:00—13:00、17:00—19:00、21:00—23:00这5个时段各采集一次样品,同一时段采集三瓶水样混匀,采样日需满足前期干旱时间>3 d以减少降雨对水质的影响,监测时间为6 d,监测月份为2023年2月,根据5个采样时刻的瞬时污水流量计算污染总负荷从而得到水质平均值。

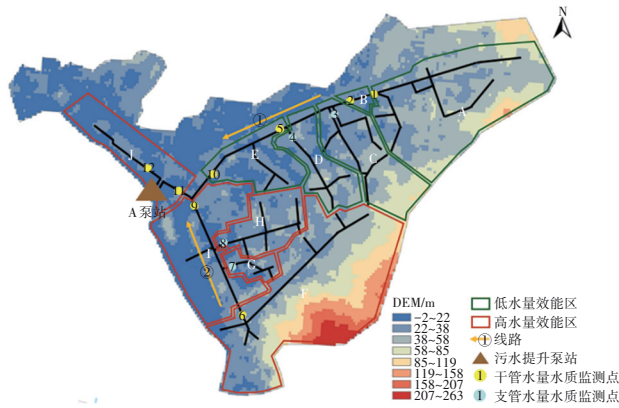


图1 水量和水质监测点分布

Fig.1 Distribution of water quantity and quality monitoring points

1.2.2 样品检测方法

采集水样的分析指标包括COD和NH₃-N,均按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。

1.3 数据处理

1.3.1 水量水质效能评估方法

根据供排水量、污染物浓度,计算污水分区管网水量效能与负荷效能,计算公式^[10]如下:

$$\varphi_1 = \frac{Q_i}{Q_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{M_i}{M_w} \times 100\% = \frac{Q_i \times C_i}{Q_w / Q_{人,日} \times K_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: φ_1 为片区水量效能; Q_i 为*i*片区收集到的污水量; Q_w 为该片区理论生活污水产生量,采用供水数据折算(折污系数取0.9); φ_2 为片区水质负荷效能,以COD和NH₃-N为研究对象; M_i 为该片区收集的污染负荷总量; M_w 为片区实际产生的污染负荷; C_i 为片区监测节点进水浓度; $Q_{人,日}$ 为居民平均生活污水排放量,基于第一次全国污染源普查结果取值为150 L/(人·d); K_i 为居民日均COD和NH₃-N排放量,根据普查结果取值分别为62.5、8.6 g/(人·d)。

1.3.2 碳源损失占比计算

根据供排平衡法与化学质量平衡法均值确定研究区外水量,以沿程监测点流量、外水量、污染物浓度定量解析碳源损失过程中外水稀释及沉降/降解作用比例,计算公式^[14]如下:

$$W_T = W_I + W_D \quad (3)$$

$$W_I = (Q_w + Q_i) \times (C_0 - C_1) \quad (4)$$

$$W_D = (Q_w + Q_i) \times (C_1 - C_2) \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \times C_i) + Q_w \times C_w + Q_i \times C_i}{\sum_{i=1}^n Q_i + Q_i + Q_w} \quad (6)$$

式中: W_T 为沿程污染物衰减总负荷,kg; W_I 为外水入渗稀释导致的污染物衰减量,kg; W_D 为管网中物理沉降、化学降解和生物转化导致的污染物衰减量,kg; Q_w 为原生污水流量,m³/s; Q_i 为外水入渗流量,m³/s; Q_i 为上游节点或沿程接入污水监测流量,m³/s; C_i 为上游或沿程排放单元污水浓度,mg/L; n 为排放单元总数; C_0 为原生污水浓度均值,mg/L; C_1 为外来水浓度,前期研究^[15-16]表明地下水、河水中COD为0.6~40 mg/L; C_2 为末端节点污染物浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 系统运行效能评估

2022年A泵站晴天COD和氨氮平均浓度分别为205、18.7 mg/L,COD浓度已低于提质增效目标值260 mg/L,氨氮浓度总体偏低。而研究区域源头排水户主要包括居民、企事业单位2种类型,按照服务范围内各类源头排水户实际用水量占比确定接入市政干管的不同类型排水户节点井的监测数量,结果表明,67处源头排水户污水COD、氨氮本底浓度平均值分别为304、40.8 mg/L。污水自源头排放至泵站,COD、NH₃-N削减率分别为32.6%、54.2%,远高于因物理沉降引发的浓度衰减比例^[17]。为诊断系统运行问题,以研究范围内污水提升泵站、各污水分区实际监测水量和水质数据为依据,根据式(1)、(2)评估泵站尺度及各污水分区水量、水质效能。

2.1.1 水量效能评估

根据2022年A泵站运行记录计算得到泵站晴天日均进水量为34 446 m³/d。泵站收水范围2022年日均抄表供水量为19 870 m³/d,按照供水量与污水收水平衡计算外水入渗量为16 563 m³/d,入渗率

为48.1%。根据式(1)计算水量效能为193%,泵站实际收集污水量为片区理论污水产生量的1.93倍,外水混入情况严重。各污水分区水量效能差异巨大,A~J片区的水量效能分别为88.2%、112.8%、111.6%、108.6%、172.5%、127.4%、159.3%、185.8%和442.7%(C片区数据缺失)。可见,上游分区水量效能明显低于下游分区,其中A片区水量效能不足100%,存在收水不完全的隐患;I、J片区水量效能远高于150%,实际收集污水量约为理论值的2倍和4倍,反映下游排水管网汇入了大量外水。

2.1.2 污染负荷效能评估

根据式(2)计算可得A泵站尺度COD负荷效能为94%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷效能为63%,污水管网基本完成对服务范围内污染物的收集输送。而各分区污染物负荷效能差异较大,污水分区A~J的COD效能为19.8%、37.6%、38.2%、46.1%、61.1%、130.5%、96.9%、33.1%和170.7%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 效能为27.8%、76.6%、37.2%、47.8%、56.3%、85.5%、111.7%、52.5%和176.4%(C片区数据缺失);污染负荷效能从上游至下游逐渐增加,上游污水分区COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷效能不足50%,推测沿程外水汇入侵占管道空间,降低了管网过流能力,引发污水外溢、物理沉降等现象,从而导致污染物收集程度不足。

综上所述,A泵站自上游至下游低浓度外水侵占管道空间,外水稀释、沉降/降解导致污染物沿程衰减。为精准剖析系统运行问题,探究水量、水质变化规律,以水量、污染负荷效能是否低于115%和50%为基准,划分低水量低负荷效能区和高水量高负荷效能区,上游A、B、D、E片区为低水量低负荷效能区,下游以高水量高负荷效能片区为主。

2.2 水量和水质变化规律及影响因素解析

2.2.1 沿程水量变化规律

将研究区东西向干管命名为线路1,收集低水量低负荷效能区污水,南北向干管命名为线路2,收集高水量高负荷效能区污水。选取整月中旱天长序列水量监测数据,排除异常数据,统计各点位运行特征,结果见图2。线路1沿程液位偏高,1号、10号监测点平均充满度分别为0.94、0.79,而5号监测点出现压力流,污水管接近全天满管运行,检查井液位位于管顶以上0.14~1.24 m。根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),DN500~600重力流污水管道的最大设计充满度为0.70,线路1的实际

运行液位高于设计标准,处于高水位运行状况。

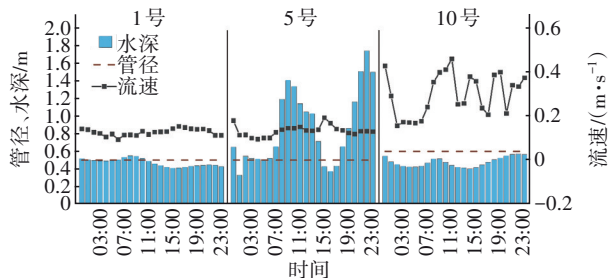


图2 线路1沿程点位水位与流速日变化监测结果

Fig.2 Monitoring results of daily variation of water level and velocity at points along line 1

沿程监测点日平均流速分别为0.13、0.14、0.30 m/s,均不满足最小设计流速0.60 m/s。线路1污水管网全长4.5 km,日平均流速均低于设计流速,其中流速<0.30 m/s的污水管道占比达68.6%,集中于5号监测点上游。已有研究表明,系统高水位运行主要是因为客水入侵^[18],但上游管道埋深浅,地下水入渗概率小,整体水量效能较低。1号、2号、5号监测点上游管网管径分别为DN400、DN500及DN600,对应最小设计坡度为0.15%、0.12%及0.10%。实际管网坡度远高于设计标准,由上游0.90%(1号点上游)减小至0.30%(5号点上游),落差变化大,排水不畅导致上游高水位运行。

线路2沿程液位、流速监测结果见图3。从上游至下游点日平均充满度分别为0.56、0.40、0.75,满足对应管径的设计充满度要求。沿程监测点日平均流速分别为0.32、0.92、0.54 m/s,末端监测点流速远高于线路1,运行工况良好。线路2污水管网全长1.6 km,起始于6号监测点,日平均流速均高于0.30 m/s,流速高于0.60 m/s的污水管道占比达92.1%。

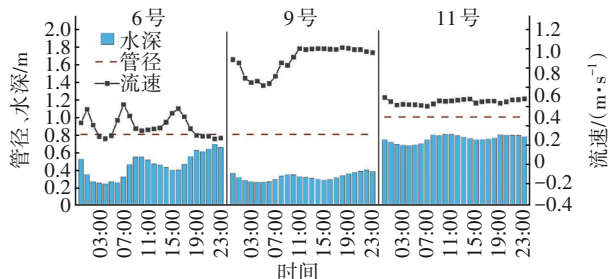


图3 线路2沿程点位水位与流速监测结果

Fig.3 Monitoring results of water level and velocity at points along line 2

管网沿程各监测点的流量时变化系数见图4。对于线路1,沿程监测点最高时污水量与日平均污

水量的比值分别为 1.20、1.31 和 1.43。而线路 2 向下游波动幅度依次减小,沿程最高时污水量与日平均污水量的比值分别为 1.47、1.39 和 1.10。流量波动规律与昆明市主城污水干管^[19]、珠海市界涌村合流制干管^[13]相似。两条线路流量日变化幅度呈相反规律,线路 1 向下游时变化系数波动幅度增大。究其原因,沿程受管道交汇、外水入渗入流等影响,下游管网流量日变化规律通常被削弱,与线路 2 变化趋势吻合。而线路 1 沿程管道充满度高,污水泵站根据前池液位控制排污泵启闭,抽水至前池水位下限停机,下游污水迅速被泵抽走,而上游高水位区域排放缓慢,因此流量日变化幅度增大。

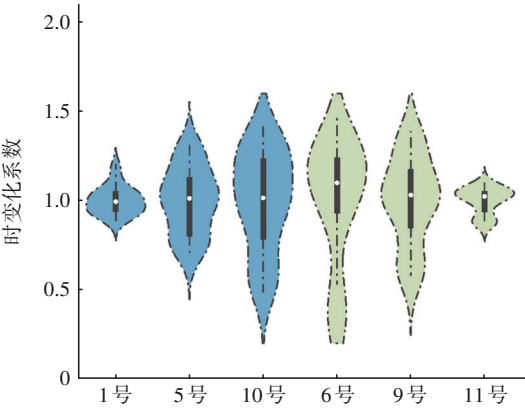


图 4 沿程流量时变化系数

Fig.4 Coefficient of variation at flow rate along the way

2.2.2 沿程水质变化规律

污水管道内环境复杂,较长管线中污水停留时间长,外水入渗、管壁微生物作用均会对污水水质产生影响。对研究区域市政干管沿程 COD、氨氮浓度展开监测。COD 和氨氮浓度变化范围分别为 93.72~179、18.1~24.3 mg/L,沿程整体呈增加趋势,可能与有机物浓度较高的支流汇入有关。COD/氨氮是污水管网颗粒物沉降现象最佳识别因子^[9],源头排水户的 COD/氨氮为 7.45,线路 1 的沿程 COD/氨氮从 5.18 上升至 7.37,下游比值接近源头地块出水,说明线路 1 上游污水管道流速小于下游,大分子有机物沉淀但溶解性氮未降低,沿程高浓度生活污水汇入补充碳源。线路 2 沿程 COD/氨氮从 7.50 下降至 6.65,受下游管道流速增加颗粒态污染物沉降减少、外水稀释溶解性污染物浓度影响。

现状污水管网清污不分易致高水位、低流速等问题,排水不畅则加剧沿程污染物衰减,使末端进

水浓度偏低。污染物物理沉降^[2]、生物转化^[3]及管道破损引发外水入渗共同影响污水水质,其中外水入渗率与地势、管道属性相关。除支流、外水等外源输入,水力条件可能是污染物在管道中迁移转化的重要影响因素。因此,选择地面高程、管底标高、坡度、充满度、停留时间、外水入渗率作为关键影响因素,探究其对沿程 COD、氨氮浓度变化的影响。

对研究区域沿程 COD、氨氮浓度与以上变量进行 Person 相关性分析,结果见图 5(*表示 $P<0.05$)。沿程 COD 浓度与停留时间呈显著负相关,随输送过程中停留时间的增长而降低。张卓群^[20]在研究重庆污水管道水质与水力学的相关性时发现,污水停留时间长不利于碳源累积,COD 主要以颗粒态形式存在,低流速下颗粒物趋于沉积,且水相与微生物相的接触机会增加,有机物去除率随之提高,这与本研究结果相吻合。桑浪涛^[21]的研究表明,颗粒态污染物的物理沉降作用是管道固-液相污染物浓度变化的关键因素,强化了污染物自身衰减的贡献。氨氮与管底标高、地面高程呈显著负相关,即管底标高、地面高程较高时氨氮浓度较低。研究区域地势东南高西北低,上游地势高于下游泵站周围片区,考虑外水稀释作用下游片区氨氮浓度应有所下降,但研究中下游片区氨氮浓度反而上升。除管网厌氧、缺氧条件下,溶解态有机氮发生氨化反应而硝化作用受限,造成末端氨氮浓度上升外,沿程干管汇集高浓度生活污水也提升了水质浓度。

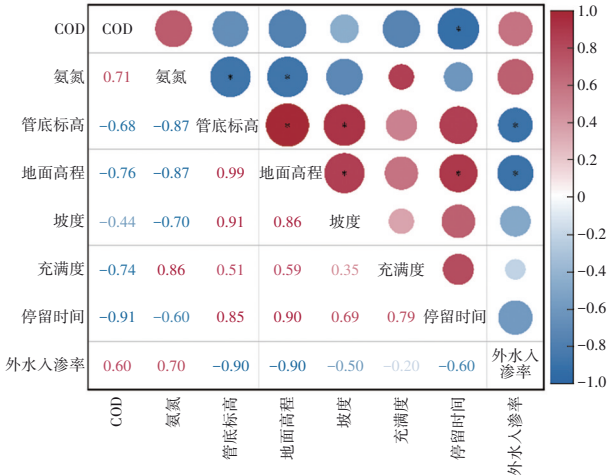


图 5 沿程水质变化影响因素相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of influential factors on water quality variation along the way

2.3 碳源损失定量及机理解析

管网中的有机物包括碳水化合物、蛋白质、脂肪等,以颗粒态为主,在缓流条件下通过物理沉降迁移至沉积物相,水相中浓度随之下降;而水相中溶解态小分子有机物在发酵细菌、产氢产乙酸细菌作用下转化为丙酸、丁酸等挥发性脂肪酸,进一步转化为结构简单的乙酸,在厌氧条件下被产甲烷菌利用生成甲烷,从而导致管网沿程碳源损失。

研究区自源头排水户排放至末端泵站COD损失比例为32.6%。已有管网污染物迁移转化的研究主要包括原位监测和室内模拟,对污染物沿程衰减比例进行计算,其中南宁市^[22]生活小区化粪池出水至地块出水的野外监测结果表明,每1 km管道中COD可削减34 mg/L,削减率为11.70%;室内模拟实验结果表明,在6~14 h的水力停留时间下COD损失了10.79%~29.74%^[6,17]。但上述削减率并未区分物理沉积、冲刷释放及生物降解各自的贡献,金鹏康等人^[23]对比有、无沉积物模拟工况指出,流速为0.32 m/s时沉积、生物降解对有机物浓度减少的贡献分别为55.60%和29.80%。管道输移过程中除发生污染物迁移转化,外水稀释对水质浓度影响也较大,而外水稀释、沉降/降解各自贡献尚不明确。

通过前文沿程水质影响因素判别可知污水管网水力条件等因素对水质衰减有较大影响,污水系统位于丘陵地区,地势起伏导致沿程坡度变化,各片区水力状况不同,对污水分区单独计算水质衰减作用贡献,结果见表1。沿程碳源损失过程中外水稀释作用占比从上游的25.33%提高至94.24%,对应的沉降/降解比例从74.67%降至5.76%,这与管道运行工况、外水入渗率核算结果呼应。上游高水位运行增加了COD沉降/降解比例,且上游地势高、地下水位较深,外水入渗率低;而下游管道流速大,污水停留时间短,沉降/降解比例减少,且下游地势低洼、靠近河道,外水入渗稀释作用加强。

表1 污水分区碳源损失占比

Tab.1 Percentage of carbon source loss in sewage partitioning %

项目	A+B	D	E	F	I	J
外水稀释	25.33	51.45	89.29	69.82	83.45	94.24
沉降/降解	74.67	48.55	10.71	30.18	16.55	5.76

2.4 污水系统提质增效对策

① 建立“源头-过程-末端”一体化水量水质

监测体系是提质增效工作的基础。现有工程案例大多局限于市政干管和重要支管,缺少源头至末端同步、系统性的监测。已有研究表明,合肥、镇江等地^[24-25]居民小区出水浓度已经偏低,仅靠管网排查、修复改造而忽略源头地块内的水质衰减会导致提质增效工作收效甚微。只有对污水系统现存问题进行全面、系统的摸排诊断,才能“对症下药”。

② 针对上游高水位、低流速区域,需优化排水系统运行模式。根据供水量折算理论污水值,上游存在污水外溢风险,可以通过降低集水井或提升泵池水位^[18]、增加瞬时大流量时排污泵运行数量降低管道水位。但需做好管道缺陷修复,减少下游大埋深管道与周边地表水、地下水连通以及上游山麓地区山泉溪水涌入。此外,可在上游支管接入点布设格栅降低管道淤积风险^[26],增大过流面积。

③ 针对下游低充满度、高外水比例区域,需开展管网排查推行清污分离。精准识别“清水”来源是削减外水的基本保证^[18],如本研究中的上游山溪水、下游河水与地下水;定期排查管网,修复缺陷,阻隔外水入渗通道;攻坚“管网最后一公里”,对分流制系统需注意源头排水户错接混接问题。

3 结论

① 污水系统末端泵站进水量为理论值的1.93倍,收集的污水中COD和NH₃-N负荷分别占应收集量的94%、63%,外水入侵稀释、沉降/降解致污染物沿程衰减。研究区上下游管网运行工况不同,上游接近满管运行,部分管道出现压力流,68.6%的管网流速低于0.30 m/s;下游平均充满度为0.57,92.1%的管网流速高于0.60 m/s。受丘陵地形影响,管网坡度落差大,排水不畅致上游高水位。

② 沿程COD、氨氮浓度呈增加趋势,低水量低负荷效能区COD/氨氮从5.18增至7.37,高水量高负荷效能区从7.50降至6.65。上游颗粒物沉降导致COD损失严重,而下游低浓度外水会稀释溶解性污染物,故沿程COD/氨氮发生变化。停留时间的增加加剧了物理沉降和生物降解,影响COD浓度;高浓度生活污水汇入、低浓度外水入侵共同影响氨氮浓度。

③ 源头排水户至泵站的碳源损失比例为32.6%,上游典型低水量低负荷效能区碳源损失以沉降/降解为主,占74.67%;下游高水量高负荷效能

区外水稀释占比高达94.24%。研究区碳源损失的关键原因为上游高水位导致的沉降/降解及下游高比例外水稀释。提质增效工作需针对性优化上游排水系统运行模式,对下游则实施清污分离。

参考文献:

- [1] 徐祖信,徐晋,金伟,等.我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J].给水排水,2019,45(3):1-5,77. XU Zuxin, XU Jin, JIN Wei, *et al.* Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(3): 1-5, 77(in Chinese).
- [2] SHI X, SANG L, WANG X C, *et al.* Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 351: 240-247.
- [3] PAI T Y, WANG S C, LO H M, *et al.* A simulation of sewer biodeterioration by analysis of different components with a model approach [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 125: 37-44.
- [4] OZER A, KASIRGA E. Substrate removal in long sewer lines [J]. Water Science and Technology, 1995, 31(7): 213-218.
- [5] 桑浪涛,石烜,张彤,等.城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J].环境科学,2017,38(5):1965-1971. SANG Langtao, SHI Xuan, ZHANG Tong, *et al.* Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network [J]. Environmental Science, 2017, 38(5): 1965-1971 (in Chinese).
- [6] 金鹏康,郝晓宇,王宝宝,等.城市污水管网中水质变化特性[J].环境工程学报,2015,9(3):1009-1014. JIN Pengkang, HAO Xiaoyu, WANG Baobao, *et al.* Characteristics of water quality variation in sewer networks [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1009-1014(in Chinese).
- [7] 邢玉坤,曹秀芹,柳婷,等.我国城市排水系统现状、问题与发展建议[J].中国给水排水,2020,36(10):19-23. XING Yukun, CAO Xiuqin, LIU Ting, *et al.* Current status, problems and development suggestions of urban drainage system in China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 19-23(in Chinese).
- [8] 周宇,唐川东,季久翠,等.城市污水管网外水入流入渗及有机物损失量化分析[J].给水排水,2022,48(7):124-130. ZHOU Yu, TANG Chuandong, JI Jiucui, *et al.* Quantitative analysis of external water infiltration/inflow and organic matter loss in urban wastewater pipe network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(7): 124-130(in Chinese).
- [9] 孙永利.城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J].中国给水排水,2020,36(2):1-6. SUN Yongli. Connotation and way of quality and efficiency improvement of municipal wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 1-6(in Chinese).
- [10] 李一平,郑可,周玉璇,等.南方城市污水处理系统效能评估与提质增效策略制定[J].水资源保护,2022,38(3):50-57. LI Yiping, ZHENG Ke, ZHOU Yuxuan, *et al.* Efficiency evaluation of a sewage system and strategy formulation of quality and efficiency improvement in city of southern China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 50-57(in Chinese).
- [11] 蔡乾凌,袁园,章亮,等.沿江某城市建成区污水处理系统问题分析及对策研究[J].中国给水排水,2023,39(18):9-14. CAI Qianling, YUAN Yuan, ZHANG Liang, *et al.* Problems analysis and countermeasures investigation of sewage treatment system in a built-up area of a city along the Yangtze River [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 9-14(in Chinese).
- [12] 张维,孙永利,郑兴灿,等.城镇居民生活污水污染物产生量测定技术难点与启示[J].给水排水,2021,47(5):52-57. ZHANG Wei, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, *et al.* Technical difficulties and inspiration in testing of domestic sewage pollutant production of urban residents [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 52-57(in Chinese).
- [13] 段庄,陈诗浩,姚娟娟,等.珠海浅丘地区城中村合流制排水的水量和水质特征[J].中国给水排水,2020,36(13):101-105. DUAN Zhuang, CHEN Shihao, YAO Juanjuan, *et al.* Wastewater quantity and quality characteristics of combined sewer system in urban village in shallow hilly region of Zhuhai City [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 101-105(in Chinese).
- [14] YANG F, ZHANG X, LI J, *et al.* Simple method to quantify extraneous water and organic matter degradation in sewer networks [J]. Environmental Science: Water

- Research & Technology, 2021, 7(1): 172-183 (in Chinese).
- [15] 杨子恒. 镇江市建成A区排水管网排查评估及研究[D]. 南京:东南大学, 2022.
- YANG Ziheng. Investigation, Evaluation and Research of Drainage Pipe Network in a District of Zhenjiang City [D]. Nanjing:Southeast University, 2022(in Chinese).
- [16] 余黎, 陈小龙, 刘皓波, 等. 污水处理厂低浓度进水的快速监测评估[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 68-71.
- YU Li, CHEN Xiaolong, LIU Haobo, *et al.* Rapid monitoring and evaluation of low concentration influent in sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 68-71(in Chinese).
- [17] 高晨晨, 孙永利, 穆莹, 等. 城市居民生活污水污染物沉积衰减规律及影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(3): 67-72(in Chinese).
- GAO Chenchen, SUN Yongli, MU Ying, *et al.* Deposition and attenuation law of pollutants in urban residential domestic sewage and its impact [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(3): 67-72 (in Chinese).
- [18] 李文秋, 张维, 孙永利, 等. 城市排水系统旱季阶段性冒溢成因及对策建议[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 17-22.
- LI Wenqiu, ZHANG Wei, SUN Yongli, *et al.* Causes and countermeasures of periodic overflow of urban drainage system in dry season [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 17-22(in Chinese).
- [19] 喻晓琴, 吕永鹏, 陈嫣, 等. 滇池流域污水管网旱季水质水量特征研究[J]. 给水排水, 2014, 40(5): 34-38.
- YU Xiaoqin, LÜ Yongpeng, CHEN Yan, *et al.* Wastewater quality and quantity characteristics of sewage network in Dianchi watershed during dry weather periods[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(5): 34-38(in Chinese).
- [20] 张卓群. 重庆市某城区污水管道水力、水质和微生物特征及其主要相关性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2021.
- ZHANG Zhuoqun. Hydraulic, Wastewater Quality and Microbial Characteristics and Key Inter-relationships for Municipal Sewer in an Urban Area of Chongqing [D]. Chongqing:Chongqing University, 2021(in Chinese).
- [21] 桑浪涛. 管道中污染物在污水-沉积物间的迁移转化规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.
- SANG Langtao. Study on the Transformation of Pollutants in Sewage Network between Sewage and Sediment [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2017(in Chinese).
- [22] 伍彬, 张鸣, 李一平, 等. 华南地区城镇居民生活污水排放规律及污染物排放量[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 196-201, 280.
- WU Bin, ZHANG Ming, LI Yiping, *et al.* Discharge law of domestic source water and pollutant discharge of urban residents in South China [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12): 196-201, 280 (in Chinese).
- [23] 金鹏康, 卞晓峥, 焦丁, 等. 城市污水管网污染物沉积与冲刷释放规律研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 253-257.
- JIN Pengkang, BIAN Xiaozheng, JIAO Ding, *et al.* On the pollutant deposition and erosion release in the urban sewer networks [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 253-257(in Chinese).
- [24] 王蕾. 十五里河流域城镇居民生活污水排放特征研究[D]. 南京:南京大学, 2018.
- WANG Lei. The Emission Characteristics of Domestic Sewage from Urban Residents in the Shiuli River Basin [D]. Nanjing:Nanjing University, 2018(in Chinese).
- [25] 彭银仙, 郑璐, 吴春笃, 等. 镇江市生活污水排放水质水量特征分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 91-94.
- PENG Yinxian, ZHENG Lu, WU Chundu, *et al.* Characteristics of domestic wastewater quality and quantity discharged of Zhenjiang City [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 26(1): 91-94(in Chinese).
- [26] 郭紫波, 栗玉鸿, 吕红亮, 等. 基于监测评估的北方丘陵城市污水提质增效研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(16): 116-123.
- GUO Zibo, LI Yuhong, LÜ Hongliang, *et al.* Research on the quality and efficiency improvement of municipal wastewater treatment in northern hilly city based on monitoring and evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(16): 116-123(in Chinese).

作者简介:钟妮倩(1999-),女,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向为水环境综合治理。

E-mail:zhongnq1999@163.com

收稿日期:2024-01-22

修回日期:2024-02-05

(编辑:李德强)