

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.05.018

排水片区源头水质时空变化特性与影响因素分析

吴智慧¹, 杨利刚², 刘小为³, 郭帅²

(1. 安徽交通职业技术学院 土木建筑学院, 安徽 合肥 230051; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 浙江大学 海洋学院, 浙江 杭州 316021)

摘要: 为探究污水管网源头水质的时空变化特征及其关键影响因素,以海南省某市主城区典型排水片区为研究对象,开展了大量现场水质采集与数据分析工作。结果表明,源头水质变化主要受到居民排水习惯、雨天入流入渗、化粪池降解等因素影响,其中,以住宅小区为主要排水户类型的排水片区源头污水COD浓度略高于以城中村为主要排水户类型的排水片区;排水高峰期源头污水的COD和NH₃-N浓度分别比平峰期间高30.69%和28.72%;源头排水户存在不同程度的雨污错混接现象,导致雨天排水户源头接驳井内污水COD和NH₃-N浓度分别比晴天时低17.07%~79.35%和4.55%~57.89%;化粪池出水COD和NH₃-N浓度相比进水的平均降幅分别为35.47%和17.81%。多元线性回归分析显示,晴雨天、排水时间段对源头污水的COD和NH₃-N浓度均影响显著,化粪池的存在对COD浓度影响显著,但对NH₃-N浓度影响不显著。因此,在进行源头污水要素排查时,需综合考虑时空变化特性与关键影响因素对源头水质的潜在影响,以确保提质增效战略的有效实施。

关键词: 排水管网; 提质增效; 源头水质; 影响因素; 时空特性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)05-0124-07

Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics and Key Influencing Factors of Source Sewage Quality in Urban Drainage Area

WU Zhihui¹, YANG Ligang², LIU Xiaowei³, GUO Shuai²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui Communications Vocational & Technical College, Hefei 230051, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 316021, China)

Abstract: To investigate the temporal and spatial variation characteristics of source sewage quality in sewer network and identify its key influencing factors, a typical drainage area in the main urban area of a city in Hainan Province was selected as the study area. Extensive field sewage quality sampling and data analysis were conducted. The results indicated that source sewage quality variation was primarily influenced by factors such as residential drainage habits, inflow and infiltration during rainfall, and septic tank degradation. Specifically, the COD concentration in source sewage was slightly higher in drainage area dominated by residential communities compared to those dominated by urban villages.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3810803)

通信作者: 郭帅 E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

During peak drainage periods, the COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in source sewage were 30.69% and 28.72% higher, respectively, than during off-peak periods. Various degrees of misconnected or mixed rainwater and sewage were observed at source discharge points, leading to reductions in COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the connection wells during wet weather by 17.07%–79.35% and 4.55%–57.89%, respectively, compared to dry weather. The average reductions in COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations after septic tank treatment were 35.47% and 17.81%, respectively. Multiple linear regression analysis revealed that weather conditions (dry/wet) and drainage time periods significantly affected both COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations, while the presence of septic tanks significantly influenced COD concentration but had no significant effect on $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration. Therefore, in the investigation of source sewage characteristics, it is essential to comprehensively consider the potential impacts of temporal and spatial variation characteristics and key influencing factors on source sewage quality to ensure the effective implementation of the quality and efficiency enhancement strategy.

Keywords: drainage network; quality and efficiency enhancement; source sewage quality; influencing factor; temporal and spatial characteristics

近年来,污水处理厂碳源不足、进水浓度较低等现象受到广泛关注,已成为制约各地污水提质增效项目难以取得显著成效的关键问题^[1]。分析认为,对源头污水浓度变化把握不到位,以及源头污水浓度排查工作不规范、不科学,是导致上述问题的主要原因。而排水片区源头污水水质变化情况复杂难测,常常与时空特性、晴雨天、化粪池等多种因素有关,目前该方面的研究方兴未艾。张卓群等^[2]总结出了不同区域生活污水水质特征表,表中反映出了不同时间、不同区域污水水质特征的异同;Cahoon等^[3]研究了美国某州东部沿海平原地区23个县93个污水处理厂的雨水入流和渗透问题,得出雨水入流和渗透带来的额外水量会稀释污水中的污染物浓度;王凯等^[4]研究表明,污水厂进水水质可生化性随着降雨规模的增大而呈现逐渐降低趋势;此外,诸多学者研究认为化粪池降解作用会造成流入市政管网的污水浓度降低,是导致污水厂进水碳源不足的主要原因之一,因此认为取消化粪池有利于提高污水厂进水水质^[5-7]。以上研究都仅仅对单一影响因素进行剖析,而源头污水实际水质情况复杂多变,并非单一因素作用所致。郑凯等^[8]基于多元线性方法对雷达在线测流系统进行研究,综合考虑多个自变量对因变量的影响程度,展现出多元线性回归方法的优点。因此,可以考虑将多元线性回归方法用于源头污水水质的影响因素分析。

笔者以海南省某市主城区典型排水片区为研

究对象,分析其源头污水在不同因素下的水质变化情况,分别对源头水质变化时空特性、雨水入流渗透、化粪池降解作用等影响因素进行分析,并采用多元线性回归方法来研究不同影响因素对源头污水COD和氨氮浓度的综合影响,全面评估源头污水水质的影响因素,以期后续污水提质增效工作中源头污水浓度精准摸排提供数据支撑与理论参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

以海南省某市主城区污水处理厂服务范围为研究区域,其服务面积约为23.77 km²,配套的主干管网总长为9.4 km,近期服务人口为15.5万人、远期为25万人,将源头排水户以泵站服务范围分为六大片区,分别为沿河泵站服务范围(1#分区)、龙头泵站服务范围(2#分区)、滨河泵站服务范围(3#分区)、南堀塘泵站服务范围(4#分区)、规划泵站服务范围(5#分区)、黄塘溪泵站服务范围(6#分区)。根据相关排查单位提供的信息,不同排水片区的主要排水户类型不同,1#、2#、5#片区以住宅小区为主要排水户类型,3#和4#片区以城中村为主要排水户类型,6#片区以住宅小区和城中村为主要排水户类型。此外,研究区域内总共排查到11 091个雨污错混接点和6 715个化粪池设施,具体分布情况如图1所示。其中,6#片区的雨污混接现象最为严重,共排查到3 554个雨污错混接点;3#片区的化粪池设施数量最多,共有2 235个。

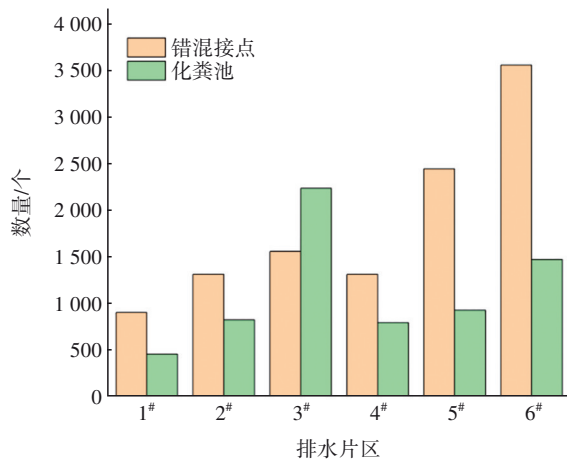


图1 各排水片区雨污错混接点和化粪池排查数据

Fig.1 Investigation data of misconnected/mixed rainwater and sewage points and septic tanks in each drainage area

1.2 采样与水质检测方法

为避免外界条件对所采集水样水质的影响,主要采用控制变量法进行采样分析。在分析时空变化特性对源头水质的影响时,主要根据当地居民生活习惯分别在平峰期间(08:00—11:00和13:00—19:00)和高峰期间(11:00—13:00和19:00—21:00)进行采样;在分析化粪池对源头水质的影响时,主要在化粪池前后的检查井分别进行采样;在分析晴雨天对源头水质的影响时,分别在晴天(连续3d没有降雨)和雨天进行采样。主要使用管道定位取样器(合肥网管家科技,型号:AIS-100)采集水样,该设备可以在满水或非满水状态下通过定点电动采样取到检查井内源头“活水”,可有效避免“死水”对后续水质检测数据的干扰。

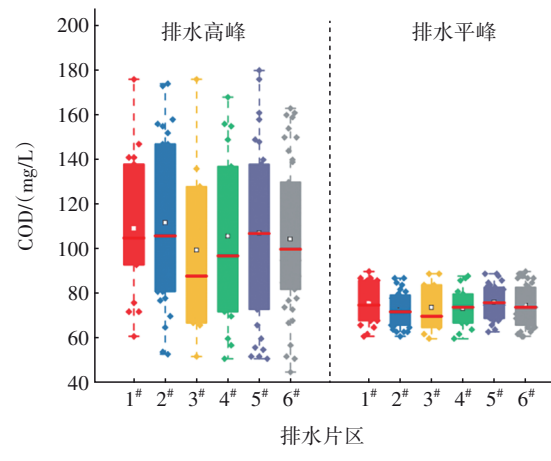
检测的水质参数主要包括pH、溶解氧、电导率、浊度、COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$,其中pH、溶解氧、电导率、浊度等指标采用多参数水质检测仪进行测定,COD采用重铬酸盐法(HJ 828—2017)检测, $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)检测。

鉴于于西龙等人^[9]的研究已经证实生活污水中的COD与BOD浓度之间存在显著的线性相关关系,因此本研究重点以COD指标来分析和评估污水水质特性。

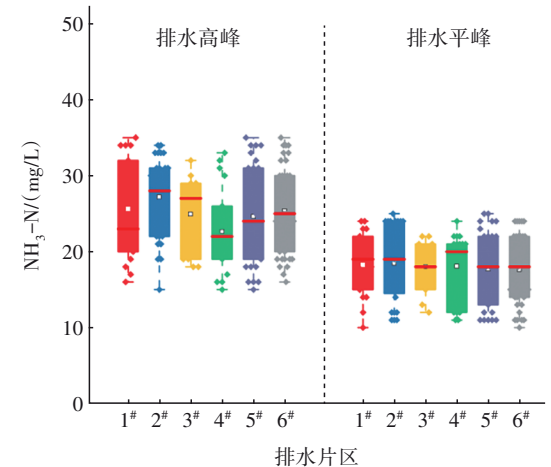
2 结果与分析

2.1 时空特性分析

为探究时空特性对源头水质的影响,在不同片区、排水户类型和排水时间分别进行采样和水质检测,结果如图2所示。



a. COD浓度



b. $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度

图2 源头污水水质的时空变化特性

Fig.2 Temporal and spatial variation characteristics of source sewage quality

由图2可知,源头污水的COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度呈现显著的时空变化规律。整体来看,主要排水户类型为住宅小区的片区源头污水COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较高,主要排水户类型为城中村的片区源头水质浓度相对较低,例如,1#~6#片区高峰期间的COD平均浓度分别为109.24、111.86、99.55、105.74、107.16和104.51 mg/L。为深入探究住宅小区与城中村排水水质差异的原因,对多个片区开展了实地勘察与调研。结果发现,相较于住宅小区,城中村的排水管网存在诸多问题:管道老化现象严重且覆盖率较低,几乎每户都设有化粪池,部分排水户甚至将污水直接排放至菜地当作化肥使用。此外,图1数据显示,与3#片区相比,1#、2#、5#片区的化粪池数量明显偏少。由此可见,这种源头污水水质差异可能缘于以下几方面因素:一是城中村家家户户普遍配备

的化粪池预处理设施,使得污水在进入主排水系统之前,其中的碳源、氮源就被消耗,导致污水浓度降低;二是城中村污水系统基础设施老化并且覆盖率不足,致使污水收集率下降,最终在数据层面呈现出显著差异。

从图2还可以看出,高峰期间源头污水的COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度明显高于平峰期间,以1#片区为例,排水高峰期间COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度分别为109.24、25.59 mg/L,而排水平峰期间COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度分别为75.71、18.24 mg/L,COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度降低幅度分别为30.69%、28.72%,这种差异应是由当地居民生活排水习惯所致。

因此,时空特性对源头污水水质存在一定影响,不同排水时间和排水片区等均会导致污水水质的差异。在进行源头污水浓度排查工作时,应综合考虑时空特性的影响,分别在排水高峰和平峰期间进行布点采样,以便于精准掌握污水源头水质,提高污水提质增效工作成效。

2.2 晴雨天对比分析

由图1可知,研究区域内存在较多雨污错混接点,这会导致污水处理厂进水因受到晴雨天的影响而出现水质波动,雨水经错混接点进入到污水系统中,会导致污水处理厂进水浓度降低^[10]。为探究雨天入流对排水片区源头市政接驳井水质的影响,分别在晴天和雨天的排水高峰期间进行定点采样和水质检测,结果如图3所示。可知,晴天源头污水的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度普遍高于雨天,雨天源头市政接驳井内污水受到雨水稀释而导致浓度较低,相对于晴天,雨天源头污水的COD浓度约降低17.07%~79.35%、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度约降低4.55%~57.89%。

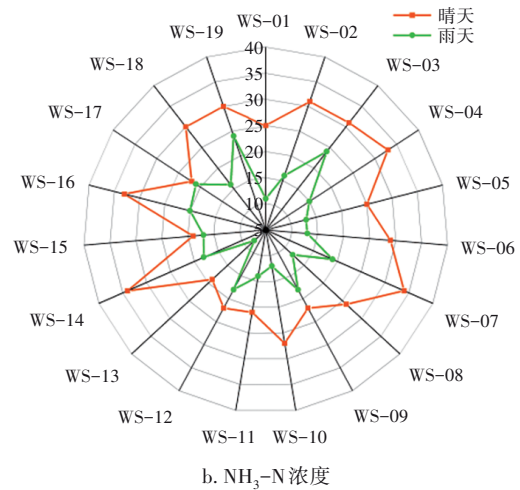
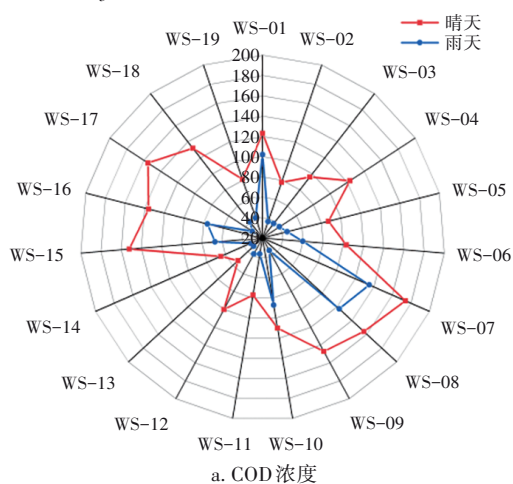


图3 源头污水水质在晴天和雨天的对比

Fig.3 Comparison of source sewage quality between dry weather and wet weather

雨水通过检查井破损点或雨污错混接点流入源头市政接驳井内,破损或错混接程度不同,导致不同市政接驳井内的雨水入流渗入量不同,从而使源头污水受到不同程度的稀释。因此,在进行提质增效工作中,有必要对排查到的雨污错混接点和破损处进行修复治理,避免雨水入流渗入而造成源头污水被稀释。

2.3 化粪池前后水质分析

目前大多将污水处理厂进水碳源不足归咎于化粪池降解等因素,个别地区如重庆、四川等已出台文件要求取消或改造成化粪池^[11]。经现场实地排查,研究区域内的化粪池设施多为三格式,由三个相互连通的密封粪池组成,详见图4,生活污水从进水口进入第一池,依次顺流到第三池,再经出水管流入市政管网系统。

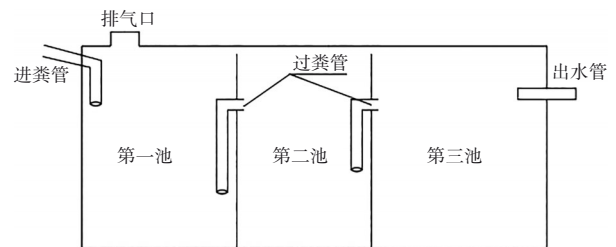


图4 三格式化粪池结构示意图

Fig.4 Diagram of three-chambered septic tank

为全面评估化粪池对源头污水水质的影响,本研究重点关注化粪池本身对污水中碳源和氮源的消耗作用,在不同时间段和不同片区对化粪池进、出水检查井内的污水进行采样和水质检测,结果如

图 5 所示。可知,源头污水在经过化粪池预处理后, COD 和 NH₃-N 浓度普遍出现不同程度的下降。化粪池进水和出水的 COD 平均浓度分别为 105.96 和 68.38 mg/L, COD 平均降幅为 35.47%; 而 NH₃-N 平均浓度则从进水的 28.08 mg/L 降到出水的 23.08 mg/L, 平均降幅为 17.81%。总体来看, 化粪池对 COD 浓度的降低幅度普遍在 25%~40% 之间, 而对 NH₃-N 浓度的降低幅度则在 10%~20% 之间。这些数据表明, 化粪池设施能够有效降解污水中的有机物, 但对氨氮的去除效果则相对较弱, 这与张卓群等^[2]和颜山脊等^[5]的研究结果相一致。化粪池设施可以显著降解污水中的有机化合物, 导致进入管网系统的污水 COD 浓度较低, 进而影响到污水处理厂的进水浓度。因此, 有必要通过对化粪池设施的优化和改造来提高源头污水浓度, 进而提升污水厂进水浓度, 推动污水处理提质增效。

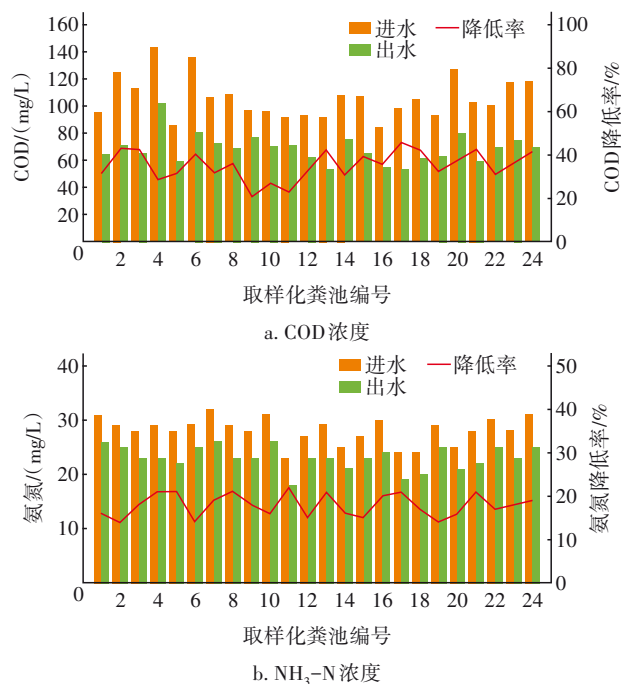


图 5 化粪池进、出水 COD 和 NH₃-N 浓度的变化

Fig.5 Variation in COD and NH₃-N concentrations in influent and effluent of septic tank

2.4 源头污水水质影响因素多元线性回归分析

源头污水水质受到多种因素的共同影响, 如化粪池设置与否、晴雨天、排水时间段等, 多元线性回归分析可以同时考虑多个自变量对因变量的影响, 揭示它们之间的复杂关系。为全面评估源头污水水质的影响因素, 采用多元线性回归方法研究不同

影响因素对源头污水中 COD 和氨氮浓度的综合影响, 建立的多元线性回归模型如下:

$$C_{\text{COD}} = a_0 + a_1C_1 + a_2C_2 + a_3C_3 \quad (1)$$

$$C_{\text{NH}_3-\text{N}} = b_0 + b_1C_1 + b_2C_2 + b_3C_3 \quad (2)$$

式中: C_{COD} 、 $C_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 分别为某排水户源头污水的 COD、NH₃-N 浓度, mg/L; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为源头水质影响因素中的化粪池设置与否、晴天/雨天、排水高峰/平峰; a_n 、 b_n 分别为对应模型的常数回归系数, n 为 0、1、2、3。

以 COD 和 NH₃-N 浓度为因变量, 以化粪池(无/有)、晴雨天(晴天/雨天)、排水时间段(平峰/高峰)为自变量, 将文本形式的自变量转换为数值形式(0/1), 通过多元线性回归模型量化各因素对水质指标的影响程度并评估其显著性, 模型的输出结果包括标准误差、 t 值、 p 值及置信区间等, 具体见式(3)、式(4)和表 1。

$$C_{\text{COD}} = 92.6033 - 31.0848C_1 - 31.2895C_2 + 33.7308C_3 \quad (3)$$

$$C_{\text{NH}_3-\text{N}} = 18.4610 - 0.1648C_1 - 2.8566C_2 + 6.6701C_3 \quad (4)$$

表 1 COD 与 NH₃-N 浓度的多元线性回归分析结果

Tab.1 Results of multiple linear regression of COD and NH₃-N concentrations

因变量	自变量	标准误差/%	t 值	p 值	95% 置信区间/(mg/L)
COD 浓度	化粪池 C_1	2.310	-13.456	0.000	[-35.629, -26.540]
	晴雨天 C_2	5.040	-6.209	0.000	[-41.204, -21.375]
	排水时间段 C_3	2.322	14.529	0.000	[29.164, 38.298]
NH ₃ -N 浓度	化粪池 C_1	0.582	-0.283	0.777	[-1.311, 0.981]
	晴雨天 C_2	1.271	-2.248	0.025	[-5.356, -0.357]
	排水时间段 C_3	0.585	11.395	0.000	[5.519, 7.822]

在多元线性回归模型中, 标准误差用于衡量估计量的精确性; t 值用于衡量回归系数的显著性程度, 其绝对值越大, 显著性越强; p 值用于评估回归系数的显著性, p 值越小, 显著性越强; 95% 置信区间表示在 95% 的置信水平下参数的真实值落在该区间内的概率为 95%。由表 1 可知, 对于 COD 浓度,

自变量 C_1 、 C_2 、 C_3 的 p 值均小于 0.05, 表明它们对 COD 浓度的影响显著, 化粪池的存在显著降低 COD 浓度, 雨天时 COD 浓度显著降低, 排水高峰期间的 COD 浓度显著高于排水高峰期间; 此外, 比较 t 值的绝对值可知, 自变量对 COD 浓度的影响程度由大到小依次为排水时间段 C_3 、化粪池 C_1 、晴雨天 C_2 。对于氨氮浓度, 晴雨天 C_2 和排水时间段 C_3 对氨氮浓度有显著影响, 并且排水时间段 C_3 的影响程度更大, 而化粪池 C_1 对氨氮浓度的影响不显著。另外, 如图 6 所示, COD 浓度多元线性回归模型残差较为符合正态分布, 而氨氮浓度多元线性回归模型残差不符合正态分布。

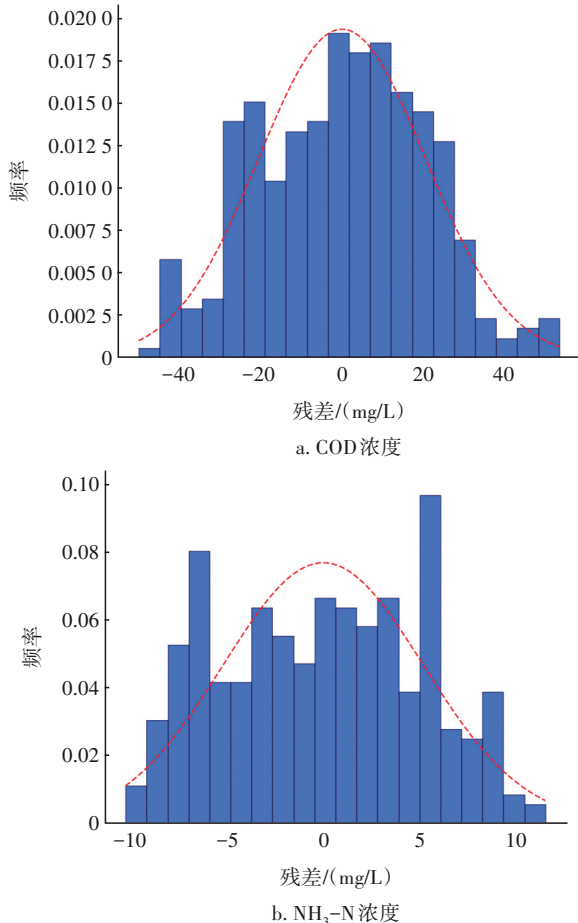


图6 COD、NH₃-N浓度的多元线性回归标准化残差直方图与正态分布曲线

Fig.6 Multiple linear regression standardized residual histogram and normal distribution plot of COD and ammonia nitrogen concentrations

3 结论

① 对于海南省某市主城区的典型排水片区, 源头水质变化主要受到居民排水习惯、雨天入流入

渗、化粪池降解等因素影响, 其中, 以住宅小区为主要排水户类型的排水片区源头污水 COD 浓度略高于以城中村为主要排水户类型的排水片区; 排水高峰期间源头污水的 COD 和 NH₃-N 浓度分别比平峰期间高 30.69% 和 28.72%; 源头排水户存在不同程度的雨污错混接现象, 导致雨天排水户源头接驳井内污水 COD 和 NH₃-N 浓度分别比晴天时低 17.07%~79.35% 和 4.55%~57.89%; 化粪池出水 COD 和 NH₃-N 浓度相比进水的平均降幅分别为 35.47% 和 17.81%。

② 多元线性回归分析结果表明, 晴雨天、排水时间段对源头污水的 COD 和氨氮浓度均影响显著, 化粪池的存在对 COD 浓度影响显著, 但对氨氮浓度影响不显著。

参考文献:

- [1] 王文倩, 赵福祥, 任欣欣. 污水处理提质增效综合评估体系构建与应用[J]. 给水排水, 2024, 50(8): 34-38.
WANG W Q, ZHAO F X, REN X X. Comprehensive evaluation system and application of quality and efficiency improvement of wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(8): 34-38 (in Chinese).
- [2] 张卓群, 杨希, 李焯, 等. 重庆城市住宅小区化粪池进出水水质监测与分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 82-89.
ZHANG Z Q, YANG X, LI Y, et al. Monitoring and analysis of septic tank influent and effluent quality in Chongqing urban residential communities [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11): 82-89 (in Chinese).
- [3] CAHOON L B, HANKE M H. Rainfall effects on inflow and infiltration in wastewater treatment systems in a coastal plain region[J]. Water Science and Technology, 2017, 75(7/8): 1909-1921.
- [4] 王凯, 刘广兵, 岳强, 等. 不同降雨规模对城镇污水处理厂进水水质水量影响分析[J]. 给水排水, 2024, 50(8): 57-63.
WANG K, LIU G B, YUE Q, et al. Analysis of the impact of different rainfall scales on the water quality and quantity of municipal wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(8): 57-63 (in Chinese).

- [5] 颜山脊,湛宇辰,方蔼琳,等. 化粪池对城市排水系统水质水量及 H_2S 排放的影响[J]. 应用化工, 2024, 53(4): 869-872.
YAN S J, ZHAN Y C, FANG A L, et al. The comprehensive influence of septic tank on urban drainage system from water quality, water quantity and hydrogen sulfide emission [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(4): 869-872 (in Chinese).
- [6] 湛宇辰,敖良根,方蔼琳,等. 取消化粪池对排水系统的影响及处置措施[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(增刊1): 96-101.
ZHAN Y C, AO L G, FANG A L, et al. Influence of canceling septic tank on drainage system and disposal measures [J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(S1): 96-101 (in Chinese).
- [7] 郑可,付浩,李一平. 基于南方城市化粪池前后水质变化特征的若干思考[J]. 给水排水, 2023, 49(10): 20-27.
ZHENG K, FU H, LI Y P. Research on the characteristics of water quality changes before and after septic tank in southern cities [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(10): 20-27 (in Chinese).
- [8] 郑凯,赵淑饶,吉俊峰,等. 基于多元线性回归的雷达在线测流系统研究应用[J]. 水文, 2023, 43(2): 30-34.
ZHENG K, ZHAO S R, JI J F, et al. Research and application of RG-30 based on multiple linear regression [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(2): 30-34 (in Chinese).
- [9] 于西龙,张学典,潘丽娜,等. COD与TOC、BOD相关性的研究及其在水环境监测中的应用[J]. 应用激光, 2014, 34(5): 455-459.
YU X L, ZHANG X D, PAN L N, et al. The research on the relationship between COD and TOC, BOD and its application on the water environmental monitorings [J]. Applied Laser, 2014, 34(5): 455-459 (in Chinese).
- [10] 张月,方帅,王阳,等. 九江黑臭水体治理与提质增效技术的阶段性总结[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 77-80.
ZHANG Y, FANG S, WANG Y, et al. Phased summary of black and odorous water body management and the quality and efficiency improvement technology in Jiujiang [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 77-80 (in Chinese).
- [11] 黄冬,蒋松竹,刘秀红,等. 我国城市化粪池建设与管理现状及特征研究[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(6): 84-88.
HUANG D, JIANG S Z, LIU X H, et al. Current status and features of septic tank construction and management in urban areas of China [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2017, 25(6): 84-88 (in Chinese).

作者简介:吴智慧(1980—),女,安徽黄山人,硕士,副教授,主要研究方向为土木市政工程优化设计。

E-mail: 8431174@qq.com

收稿日期:2025-07-17

修回日期:2025-08-27

(编辑:刘贵春)

统筹水资源、水环境、水生态治理,
深入推进长江、黄河等大江大河和重要湖泊治理