

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.003

污水厂高氧化性出水入流掺混管网对污染物衰减影响

张 维^{1,2}, 吴宝利^{1,2}, 马换梅^{1,2}, 孙永利^{1,2}, 李 劭¹, 顾 森¹,
王诣达¹, 田腾飞¹, 米鑫豪¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 天津市城镇排水系统重点实验室, 天津 300074)

摘 要: 以污水处理厂出水和生活污水为研究对象,研究了两者掺混前后的氧化还原特性以及有机物、氮、磷浓度的衰减变化规律。当以1:1的体积比掺混后,生活污水中的COD、BOD₅、TN、NH₃-N、TP、PO₄³⁻浓度因稀释作用而快速衰减,基本遵循物理稀释定律;在掺混反应4 h后,BOD₅再次快速衰减,反应10 h的净衰减率、净衰减速率分别为36.54%和4.12 mg/(L·h)。分析认为,稀释作用是导致生活污水污染物浓度衰减的首要原因,而污水处理厂出水带来的氧化性物质促使微生物快速增殖后进行氧化还原反应,是导致生活污水BOD₅浓度进一步衰减的关键因素。

关键词: 高氧化性出水; 入流掺混; 污染物浓度; 稀释衰减; 氧化衰减

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0014-06

Effect of Inflow Mixing of Highly Oxidizing Effluent from WWTP on Pollutant Attenuation

ZHANG Wei^{1,2}, WU Bao-li^{1,2}, MA Huan-mei^{1,2}, SUN Yong-li^{1,2}, LI Mai¹,
GU Miao¹, WANG Yi-da¹, TIAN Teng-fei¹, MI Xin-hao¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Urban Drainage System, Tianjin 300074, China)

Abstract: Taking the effluent from wastewater treatment plant (WWTP) and the raw domestic sewage as the research object, the redox characteristics and the attenuation laws of organic matter, nitrogen and phosphorus concentration before and after the mixture were studied. The results showed that the concentrations of COD, BOD₅, TN, NH₃-N, TP and PO₄³⁻ in domestic sewage decreased rapidly due to the dilution after mixing the effluent of WWTP with the domestic sewage at a ratio of 1:1, which basically followed the physical dilution law. After mixing for four hours, BOD₅ decayed rapidly again, and the net decay ratio and net decay rate of 10 h were 36.54% and 4.12 mg/(L·h), respectively. The analysis showed that dilution was the primary reason for the concentration attenuation of pollutants. The oxidizing substances in the effluent of WWTP could facilitate the rapid proliferation of microorganisms, and then promote the redox reaction, which was the key to the further attenuation of BOD₅.

Key words: highly oxidizing effluent; inflow mixing; pollutant concentration; dilution attenuation; oxidation attenuation

自《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》发布实施以来,我国城镇排水行业逐步实现由规模增长向效能提升的重要转变,污水处理厂进水污染物浓度及城市生活污水集中收集率受到高度关注。城市河湖水、工业企业废水、地下水、山泉山溪水、施工降水等低浓度非生活污水入流掺混污水管网,不仅会挤占收集管网及污水处理厂的有效空间,降低排水设施自身的调蓄能力,还会对生活污水污染物浓度形成明显的稀释作用,甚至可能由于含有较高的DO、硝酸盐等氧化性物质加剧有机物尤其是BOD₅的衰减,这是我国城镇污水处理厂进水污染物浓度以及污水收集处理系统运行效能偏低的重要原因之一^[1]。

早在20世纪中叶,国外学者在向污水收集管道内注入氧气、硝酸盐等氧化性物质来抑制H₂S等有毒有害气体产生时,就同步观察到了生活污水中有有机物的加速衰减,COD的衰减率可达到70%^[2-3]。但是,可能由于非生活污水入流掺混污水管网进而显著影响排水系统收集处理效能的情况在其他国家并不多见,对于非生活污水入流掺混的研究鲜有报道。随着我国污水处理提质增效工作的不断推进,国内已有一些学者^[4-6]针对河湖水、地下水等非生活污水入流排水系统以后对污水处理厂水质、水量的影响进行了研究探讨,但对于非生活污水入流掺混污水管网,尤其在高排放标准要求下具有较强氧化性的污水处理厂出水、工业企业废水等掺混生活污水后各类污染物浓度的影响规律以及影响机制却未涉及。

笔者以城镇污水处理厂深度处理工艺段的高氧化性出水与源头居民小区的生活污水作为试验用水,研究了两者掺混后有机物、氮、磷等污染物的衰减规律,以期评估高氧化性非生活污水入流掺混对污水收集管网运行效能的影响,并提出针对性治理对策和建议提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验用水

试验所用污水处理厂高氧化性出水为北方某城镇污水处理厂深度处理工艺段(深床滤池+臭氧氧化+次氯酸钠消毒)的瞬时出水,生活污水为同一地区某居民小区化粪池出水与少量餐饮废水的混合污水。试验用水水质如表1所示。

表1 污水处理厂高氧化性出水和生活污水水质参数

Tab.1 Water quality parameters of highly oxidizing effluent of WWTP and domestic sewage

项目	高氧化性出水	生活污水
COD/(mg·L ⁻¹)	27.6	504
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	3	287
TN/(mg·L ⁻¹)	9.86	101.34
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	—	79.30
NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	7.10	0.80
TP/(mg·L ⁻¹)	0.23	10.24
PO ₄ ³⁻ /(mg·L ⁻¹)	0.08	7.97
DO/(mg·L ⁻¹)	12.78	0.08
ORP/mV	97.0	-330.3
水温/℃	17.8	16.7

1.2 试验方法

为了避免重力沉降、空气(氧气)进入等因素对污染物衰减结果的影响,将采集的生活污水静沉24 h以上后采用100目筛网过滤去除大部分颗粒态、悬浮态污染物后使用,并在密闭环境下进行。试验采用30 L有机玻璃柱,搅拌转速控制在10~20 r/min。将高氧化性出水与生活污水以1:1的体积比进行掺混反应,考虑到难以完全规避微生物作用下污染物的自然衰减,同步设置生活污水作为空白样。

污水中污染物(COD、BOD₅、TN、TP等)的净衰减率(η)计算公式如下:

$$\eta = \left(\frac{C_{\text{始}} - C_{\text{终}}}{C_{\text{始}}} - \frac{C_{0\text{始}} - C_{0\text{终}}}{C_{0\text{始}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_{\text{始}}$ 、 $C_{\text{终}}$ 分别为掺混后混合污水初始及反应一段时间后的污染物浓度,mg/L; $C_{0\text{始}}$ 、 $C_{0\text{终}}$ 为空白样的初始及反应一段时间后的污染物浓度,mg/L。

污染物的净衰减速率(v)计算公式如下:

$$v = \frac{C_{\text{始}} - C_{\text{终}}}{t} - \frac{C_{0\text{始}} - C_{0\text{终}}}{\theta t} \quad (2)$$

式中: θ 为生活污水的体积稀释倍数; t 为反应时间,min或h。

1.3 检测项目及方法

COD、BOD₅、TN、TP、NH₃-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻指标依据标准方法测定,DO、ORP、水温采用哈希HQ30d便携式电化学分析仪测定。

2 结果与讨论

2.1 入流掺混对污水水质的影响

2.1.1 DO、ORP变化

生活污水的DO、ORP分别为0.08 mg/L、

-330.3 mV, 表现为强还原状态, 而污水处理厂出水的DO、ORP分别为12.78 mg/L、97.0 mV, 表现为较强的氧化状态。为了研究掺混前后氧化还原状态的变化以及污染物浓度衰减的关联关系, 考察了两者掺混后的DO和ORP历时变化, 具体见图1。

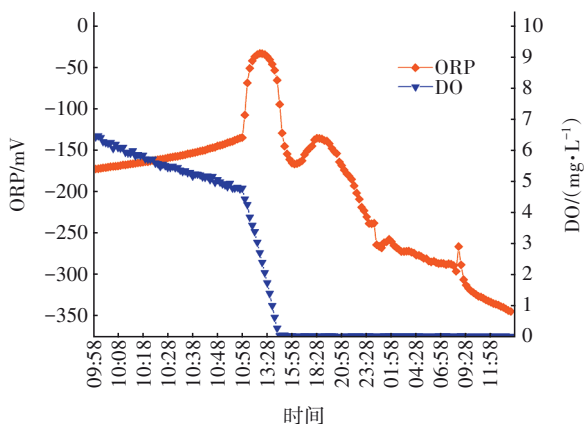


图1 掺混水DO、ORP的历时变化

Fig.1 DO and ORP variation in mixed water

由图1可知, 生活污水与污水处理厂高氧化性出水掺混后(以下简称“掺混水”), 其DO在瞬间快速升高, 反应1 min左右达到最高值6.48 mg/L, 而后呈分段直线下降趋势, 第一阶段发生在掺混后的前1 h, DO由6.44 mg/L降至4.79 mg/L, 下降速率为1.68 mg/(L·h); 第二阶段为2~5 h, 进一步降至0.05 mg/L以下, 下降速率为1.98 mg/(L·h), 而后直至试验结束, DO一直维持在厌氧水平。掺混后ORP由-330.3 mV快速升至-172.1 mV, 而后呈阶梯式升高再波动下降的趋势, 升高的第一阶段与DO下降的第一阶段完全重合, 第二阶段呈抛物线式上升, 在接近反应的2.8 h时达到最高值-32.4 mV, 此时DO为2.71 mg/L, 在反应约5 h时降至-100 mV以下, 而此时DO也恰好降至0.05 mg/L左右。

由上述DO、ORP的变化规律可知, 掺混后原处于厌氧状态的生活污水瞬间被充氧转换为富氧状态, 系统也随之由强还原状态逐步向氧化状态转变, 但随着DO逐渐被消耗殆尽, 又由氧化状态向还原状态变化, 最终在掺混后的26 h左右, 再次恢复到-330 mV左右。由于高氧化性出水是经过臭氧氧化+次氯酸钠消毒工艺处理后的水, 其不但可能有残余消毒剂, 还可能存在 O_3 、 O_2 甚至是氧化性更强的羟基自由基($\cdot OH$), 这是其表现为较强氧化性的主要原因。而在反应的前5 h, DO、ORP呈现明显的

负相关变化, 说明高氧化出水中的 O_2 可能是导致掺混水发生上述氧化还原状态转化的主要因素。此外, 第一阶段的DO下降速率低于第二阶段, 说明前1 h的耗氧速率低于2~5 h的, 结合试验过程中观察到的悬浮物增长现象, 推测这可能与第一阶段微生物量较少, 而第二阶段微生物量增长有关。

2.1.2 有机物浓度变化

掺混水的COD、 BOD_5 浓度变化情况见图2。

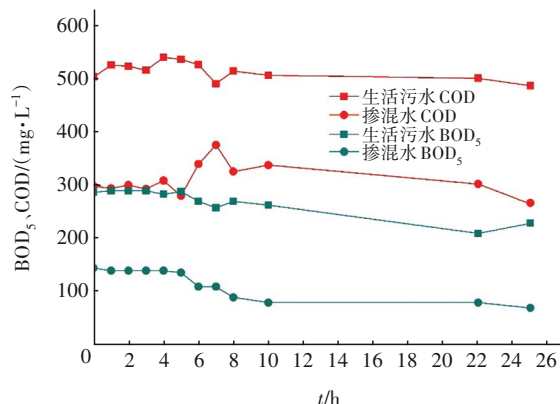


图2 掺混水有机物浓度历时变化

Fig.2 Organic matter variation in mixed water

反应初始, 污水中COD、 BOD_5 的浓度均由于掺混了有机物浓度较低的高氧化性出水而发生稀释衰减。生活污水起始COD浓度为504 mg/L, 在掺混高氧化性出水后, 其浓度快速降至299 mg/L, 随着时间的延长, 掺混水的COD浓度呈先升高再波动下降的趋势, 前10 h的大部分COD浓度高于初始浓度, 可见, 高氧化性出水中的氧化性物质并未对COD产生直接氧化效果, COD浓度波动可能与掺混后出现悬浮物增长并团聚而导致的取样不均有关。25 h的COD衰减率为11.2%, 高于空白对照组的3.3%, 净衰减率为7.9%, 低于Raunkjær等^[7]提出的14%的COD衰减率(可认为是重力管道输送的自然衰减率)。25 h的衰减速率为1.34 mg/(L·h), 净衰减速率为1.01 mg/(L·h)。

与COD相比, 快速混合稀释后的掺混水 BOD_5 浓度衰减更为显著。掺混水起始 BOD_5 浓度为145 mg/L, 在反应的前4 h, BOD_5 浓度变化并不明显, 但在之后出现快速衰减, 至第10小时降低至80 mg/L, 而后浓度变化趋于平稳。反应10、25 h的 BOD_5 衰减率分别为44.86%和51.76%, 净衰减率分别为36.54%、31.55%, 明显高于Raunkjær等^[7]提出的25%的溶解性COD衰减率。反应10、25 h的衰减速

率分别为 6.51、3.00 mg/(L·h), 净衰减速率为 4.12、1.84 mg/(L·h), 在 Tanaka 等人^[8]研究得出的厌氧状态下溶解性 COD 衰减速率为 0~12 mg/(L·h) 的范围内。掺混水的初始 BOD₅ 实测值与其理论值相同, 可见, 高氧化性出水掺混后也未对 BOD₅ 形成直接氧化作用, 而 BOD₅ 出现显著衰减的时间点, 与掺混后 ORP 降至 -100 mV 以下、DO 降至 0.05 mg/L 以下的时间点基本吻合, 由此推测, BOD₅ 的衰减可能与进入兼氧状态后发生的微生物氧化还原反应有关。

2.1.3 氮污染物浓度变化

掺混水的 TN、NH₃-N 和 NO₃⁻-N 浓度历时变化见图 3。

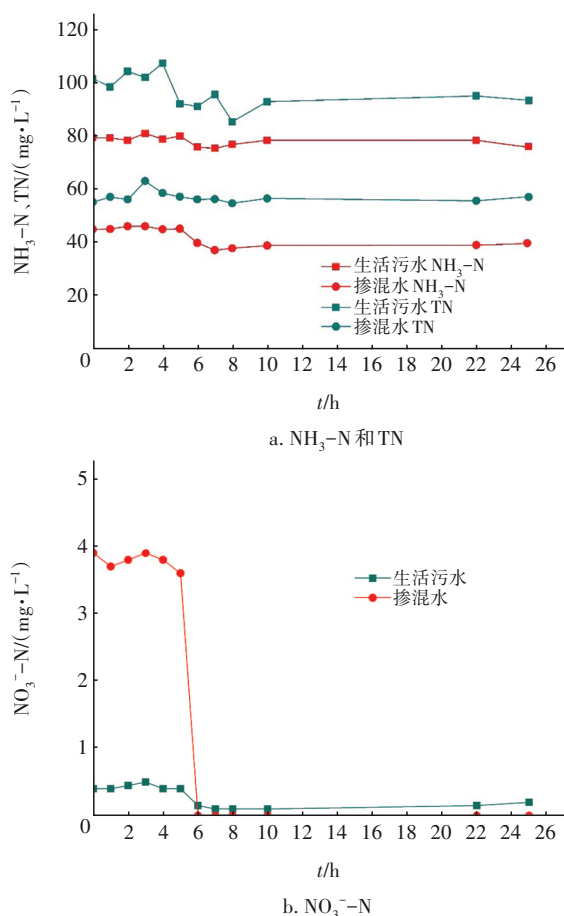


图3 掺混水氮污染物浓度历时变化

Fig.3 Nitrogen pollutant variation in mixed water

由图 3 可知, 反应初始, TN、NH₃-N 均由于低浓度高氧化性出水的掺混产生明显的浓度衰减。掺混水 TN 起始浓度为 55.17 mg/L, 后续过程中在 54.70~63.00 mg/L 范围波动, 25 h 后浓度为 57.2 mg/L, 相比初始浓度还有所升高, 且过程中未观察

到明显降低, 而空白组 TN 自第 4 小时之后有少量衰减, 25 h 的衰减率为 7.94%。由于整个试验过程中无其他污水和物质进入系统, TN 升高的原因可能与 COD 类似, 均是悬浮物增长团聚导致的取样不均匀所致。掺混水的初始 NH₃-N 浓度为 45.00 mg/L, 高于其理论掺混值, 且在前 5 h 几乎无变化, 而同时 TN 浓度也无明显变化, 说明残余消毒剂以及其他氧化性物质并未引起有机氮向 NH₃-N 的转化, 也未直接与 NH₃-N 发生氧化还原反应; 在 5~7 h 之间, 由 45.20 mg/L 降至 37.20 mg/L, 与 BOD₅ 的衰减开始时间一致, 均可能与微生物作用有关。经测算, NH₃-N 的 25 h 衰减率为 11.78%, 净衰减率为 7.24%, 衰减速率为 0.21 mg/(L·h), 净衰减速率为 0.14 mg/(L·h), 低于 COD、BOD₅ 的净衰减率和净衰减速率。

生活污水来自化粪池出水, 其 NO₃⁻-N 浓度非常低, 在掺混高氧化性出水后快速升高至 3.95 mg/L。在掺混后的前 5 h, NO₃⁻-N 处于波动状态, 与 BOD₅、NH₃-N 相同, 也是从第 5 小时开始浓度出现快速降低, 在第 6 小时时已经降低至检测下限水平, 25 h 净衰减率为 50%。结合掺混水的 DO、ORP 变化推测, NH₃-N 与 NO₃⁻-N 的衰减很可能与微生物氧化还原反应有关, 而充足的电子供体 (BOD₅/NO₃⁻-N=37.92) 以及兼氧环境 (DO<0.05 mg/L) 为微生物进行氧化还原反应(反硝化)提供了有利条件。

2.1.4 磷污染物浓度变化

掺混水 TP、PO₄³⁻ 浓度的历时变化见图 4。反应初始, 掺混稀释作用导致 TP、PO₄³⁻ 浓度快速降低。掺混水的起始 TP 浓度为 5.52 mg/L, 过程中变化不明显, 在 5.10~5.80 mg/L 之间波动, 掺混后 25 h 的衰减率仅为 3.98%, 核减空白样的衰减率 0.1% 后, 其净衰减率为 3.88%, 净衰减速率为 0.008 mg/(L·h), 远低于 COD、BOD₅ 的衰减率和衰减速率。

掺混水 PO₄³⁻ 浓度呈现升高-降低-升高的变化过程, 起始浓度为 3.78 mg/L, 在 0~5 h 上下波动, 与 NH₃-N 和 NO₃⁻-N 的衰减开始时间相同, 也是第 5 小时之后开始降低, 均可能与微生物作用有关; 第 7 小时降至最低值 3.39 mg/L 后又逐渐升高, 反应 25 h 后为 3.81 mg/L, 与初始浓度基本一致, 这很可能与反应后期进入厌氧状态有关, 由于非溶解态的有机磷转化为溶解态 PO₄³⁻ 所致。而空白组的 PO₄³⁻ 浓度是先升高再降低, 25 h 的衰减率为 8.66%, 有厌氧环境下有机磷向 PO₄³⁻ 转化的影响, 也有微生物生长繁

殖吸收 PO_4^{3-} 的影响。

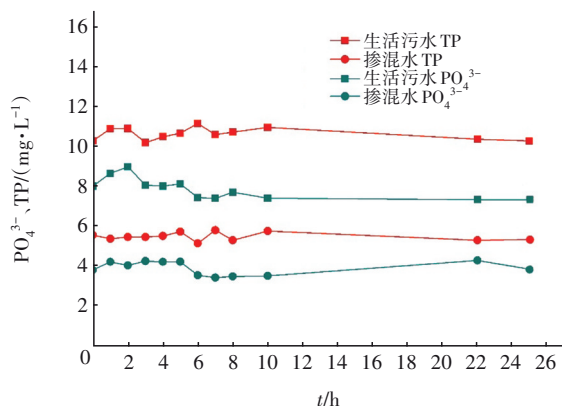


图4 掺混水磷污染物历时变化

Fig.4 Phosphorus pollutant variation in mixed water

2.2 污染物衰减转化机理探讨

2.2.1 稀释衰减

生活污水与高氧化性出水掺混后, COD、BOD₅、TN、NH₃-N、NO₃⁻-N、TP、PO₄³⁻、DO 实测浓度和理论加权平均浓度分别为 299、145、55.17、45.00、3.90、5.52、3.78、6.44 mg/L 和 266、145、55.60、39.65、3.95、5.24、4.02、6.43 mg/L。结合 2.1 节的分析可知, 生活污水与高氧化性出水以体积比为 1:1 进行掺混后, COD、BOD₅、TN、NH₃-N、TP、PO₄³⁻ 浓度均出现快速下降, 而 NO₃⁻-N 浓度升高。其中, BOD₅、TN、NO₃⁻-N、DO 掺混后实测浓度与理论加权浓度基本相同, 而 COD、NH₃-N、TP 实测浓度高于理论浓度, PO₄³⁻ 的实测浓度低于理论浓度。采用相同方法进行多组掺混反应试验结果表明, 无论是溶解态, 还是非溶解态的水质指标, 其掺混后的实测浓度与理论浓度多会出现一定差异, 但差异基本在 ±15% 以内。

经过分析可知, 导致上述差异的原因可能是多方面的: 一是由于两种污水含有各种无机离子, 快速掺混过程中难免发生化学氧化还原、中和反应, 这种主要涉及溶解态污染物, 大多数会表现为浓度的降低; 二是由于快速掺混操作基本在数十秒内完成, 在取初始样品时可能还未完全混合, 而这主要涉及非溶解态污染物; 此外, 试验过程中的操作误差也是在所难免的。但可以确定的是, 当浓度相对较低的高氧化性出水入流掺混污水管网后, 首先会对生活污水的 COD、BOD₅、TN、NH₃-N、TP、PO₄³⁻ 这些主要污染指标形成稀释作用, 导致其浓度衰减, 上述指标以及 NO₃⁻-N、DO 都基本遵循物理稀释定

律, 而 ORP 表征的是混合液的氧化还原状态, 并不遵循物理稀释定律。

2.2.2 氧化衰减

具有氧化性的非生活污水入流掺混污水管网后对有机物, 尤其是 BOD₅ 的衰减影响以及影响机理鲜有人探究。试验所用污水处理厂高氧化性出水为经过臭氧氧化和次氯酸钠消毒处理后的出水, 从 DO 和 ORP 判断, 其仍保有较高浓度的 O₂, 加之硝酸盐等氧化性物质的影响, 当与存在大量有机物的还原性生活污水掺混后, 很容易发生氧化还原反应, 而这可能是导致 BOD₅ 进一步衰减的关键因素。

由 2.1 节的分析可知, 高氧化性出水与生活污水掺混后, 在前 4 h 各水质指标并没有发生明显变化, 但在之后 BOD₅ 发生快速衰减, 而此时恰好是掺混水 ORP 降至 -50 mV、DO 降至 1 mg/L 的时间点, 是由好氧转为兼氧的转折点; 在之后将近 6 h 的反应过程中, BOD₅ 由 140 mg/L 降至 80 mg/L, 同步衰减的还有 NO₃⁻-N、NH₃-N 和 PO₄³⁻, 这个过程中 ORP 在 -160~ -50 mV 间波动, DO 维持在低于 0.05 mg/L 的水平, 这表明掺混水处于兼氧状态; 在 10~25 h, ORP 一直在逐渐降低, 处于 -350~-160 mV, DO 也降至 0.03 mg/L 以下, 表明掺混水已基本进入厌氧状态。可见, BOD₅ 的氧化衰减主要发生在兼氧状态下, 而这恰好是微生物进行氧化还原反应所需要的环境。

试验所用生活污水虽然提前去除了大部分颗粒物和悬浮物, 但仍无法避免生活污水本身及流经化粪池所带来的微生物的影响, 而其中自然也包括兼性厌氧微生物。通常情况下, 兼性厌氧微生物在有氧条件下会进行有氧呼吸而发生增殖, 高氧化性出水带来的 O₂ 恰好为兼性厌氧微生物的大量繁殖提供了有利条件, 这一过程主要发生在掺混后的前 4 h, 也就是 DO 相对较高的时间段, 而试验过程中也观察到了悬浮物(菌胶团)的明显增长、DO 在第 2 小时之后的快速消耗; 第 1 小时耗氧速率较低, 可能与残余消毒剂等氧化性物质对微生物的抑制作用有关。而由于微生物增殖并不会使其合成利用的底物(BOD₅)从系统内去除, 所以前 4 h 几乎没有观察到 BOD₅ 的衰减, 而当进入兼氧状态后, 大量兼性厌氧微生物共同作用发生氧化还原反应, BOD₅ 作为电子供体最终被氧化为 CO₂ 和 H₂O, 是 BOD₅ 浓度衰减的主要因素, 而 NO₃⁻-N、NH₃-N 和 PO₄³⁻ 的同步降低也印证了这一猜想。

此外,多次重复试验均观察到了悬浮物的增长和团聚现象,取样过程中悬浮物的影响以及微生物氧化还原反应带来的TN、TP本身的衰减量相对来说较低,可能是上述指标没有观察到明显衰减且上下波动的主要原因,但同时也说明,有机物(尤其是BOD₅)、氮和磷的这种不成比例的衰减也进一步加剧了生活污水碳氮磷比例失调的问题。

3 结论与建议

① 污水处理厂高氧化性出水与生活污水以1:1的体积比掺混后,生活污水的COD、BOD₅、TN、NH₃-N、TP、PO₄³⁻浓度受到稀释作用影响而快速衰减,掺混后的初始浓度基本遵循物理稀释定律。

② 在掺混后4~10 h, BOD₅由140 mg/L快速衰减至80 mg/L, 10、25 h的净衰减率和净衰减速率分别为36.54%、31.55%和4.12、1.84 mg/(L·h); 25 h后COD、NH₃-N、NO₃⁻-N、TP的净衰减率分别为7.9%、7.24%、50%、3.88%, PO₄³⁻在反应过程中有衰减,但随后又上升超过初始浓度, TN全程未观察到明显衰减。

③ 稀释作用是导致生活污水污染物浓度衰减的首要原因,而污水处理厂高氧化出水含有的氧化性物质(O₂)为兼性厌氧微生物的快速增殖带来了有利条件,在其诱导下发生的微生物氧化还原反应是导致BOD₅进一步衰减的关键因素。

④ 不同类型的非生活污水所带来的氧化性物质不同,而按不同比例掺混后有机物、氮、磷浓度的衰减变化规律可能也会有所差异,建议进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 孙永利, 吴凡松, 李文秋, 等. 城市生活污水集中收集率和污水处理厂进水浓度问题的思考[J]. 给水排水, 2023, 49(1): 41-46.
- SUN Yongli, WU Fansong, LI Wenqiu, *et al.* Reflections on the centralized collection rate of municipal sewage pollutants and the influent concentration of wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49 (1) : 41-46 (in Chinese).
- [2] POMEROY R, BOWLUS F D. Progress report on

sulfide control research [J]. Sewage Works Journal, 1946, 18(4): 597-640.

- [3] BOON A G, SKELLETT C F, NEWCOMBE S, *et al.* The use of oxygen to treat sewage in a rising main [J]. Water Pollution Control, 1977, 76(1): 98-112.
- [4] 董进波, 汤燕, 马顺博, 等. 镇江市某城镇污水处理系统外水分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 92-98.
- DONG Jinbo, TANG Yan, MA Shunbo, *et al.* Analysis of extraneous water in an urban sewage treatment system in Zhenjiang [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (8): 92-98 (in Chinese).
- [5] 陈泽鑫, 邹秋云, 江璟航, 等. 珠海市横琴新区污水系统病害分析及提质增效思路[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2): 78-84.
- CHEN Zexin, ZOU Qiuyun, JIANG Jinghang, *et al.* Analysis of sewage system problems in Hengqin New Area of Zhuhai City and ideas of improving quality and efficiency [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (2): 78-84 (in Chinese).
- [6] 李超, 鲁梅, 刘绪为, 等. 提质增效背景下水质水量平衡简易测算与实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38 (16): 129-134.
- LI Chao, LU Mei, LIU Xuwei, *et al.* Simple calculation and practice of water quality and quantity balance for improving quality and efficiency [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(16): 129-134 (in Chinese).
- [7] RAUNKJÆR K, HVITVED-JACOBSEN T, NIELSEN P H. Transformation of organic matter in a gravity sewer [J]. Water Environment Research, 1995, 67 (2) : 181-188.
- [8] TANAKA N, HVITVED-JACOBSEN T. Transformation of wastewater organic matter in sewers under changing aerobic/anaerobic conditions [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(1): 105-113.

作者简介:张维(1983-),女,河北廊坊人,硕士,高级工程师,研究方向为城镇排水以及城镇水环境治理技术、标准与政策。

E-mail:chinawei1983@163.com

收稿日期:2024-01-04

修回日期:2024-01-19

(编辑:李德强)