

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.010

# 城市居民生活污水污染物沉积衰减规律及影响

高晨晨, 孙永利, 穆莹, 刘钰, 王诣达, 李思雨, 王金丽,  
葛铜岗

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘要:** 城市污水管网的运行流速是影响污染物收集处理效能的重要因素。为分析污水在管网输送过程中受沉积作用的影响,以居民源头排放的生活污水为对象,研究污水在较不利流态条件下污染物的沉积衰减规律。结果表明,按照输送距离测算,当沉积时间为10 h时,污水中SS、COD和TP浓度分别下降了61.1%、18.2%和9.3%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度提高了8.7%,导致COD/TN、COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD/TP和COD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别降低了19.9%、24.8%、11.9%和18.0%。由此可见,污水输送过程中污染物的沉降淤积是导致污水处理厂进水浓度偏低、碳氮比失调的重要原因,建议充分考虑管网运行工况对污染物收集处理效能的综合影响。

**关键词:** 生活污水污染物; 污水管网; 沉积衰减; 污染物收集量; 进水浓度; 提质增效  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0067-06

## Deposition and Attenuation Law of Pollutants in Urban Residential Domestic Sewage and Its Impact

GAO Chen-chen, SUN Yong-li, MU Ying, LIU Yu, WANG Yi-da, LI Si-yu,  
WANG Jin-li, GE Tong-gang

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074,  
China)

**Abstract:** The flow velocity of urban sewage sewer network is an important factor affecting the efficiency of pollutant collection and treatment. To analyze the influence of deposition on sewage transportation in the sewer system, this paper investigated the deposition and attenuation law of pollutants in domestic sewage discharged from residential sources under unfavorable flow conditions. According to the transportation distance, the deposition time was 10 hours. The concentrations of SS, COD and TP in sewage decreased by 61.1%, 18.2% and 9.3%, respectively, while  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration increased by 8.7%. As a result, the COD/TN, COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$ , COD/TP and COD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  decreased by 19.9%, 24.8%, 11.9% and 18.0%, respectively. Therefore, the deposition of pollutants in the sewage transportation process was an important cause for the low influent concentration and imbalance of C/N ratio in the sewage treatment plant. It is suggested to fully consider the comprehensive influence of sewer network operating conditions on the collection and treatment efficiency of pollutants.

**Key words:** domestic sewage pollution; sewage sewer network; deposition and attenuation;

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203204)

通信作者: 孙永利 E-mail: tjsunyongli@163.com

pollutant collection amount; influent concentration; quality and efficiency improvement

城市排水管网是雨污水排放的主要通道,也是影响居民生活污水污染物收集效能的关键要素。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)要求污水管道在设计充满度下的最小设计流速应为0.6 m/s,雨水管道和合流管道在满流时的最小设计流速应为0.75 m/s。流速是管道运行效果的重要评价指标之一,直接决定了污水中的颗粒物是否会发生沉降。受多种因素制约,我国污水管网多数处于低流速状态,很多城市污水管网和合流制管网的旱季流速只有0.1~0.3 m/s,甚至更低,污水输送过程中的污染物沉积问题比较突出<sup>[1]</sup>。而污水中的颗粒物携带有机物在管道内沉积,是导致污水处理厂进水浓度偏低、碳氮比失调以及降雨期间管道污泥冲刷入河污染水质等一系列棘手问题的重要原因。

国内外学者对污水污染物在管网中的衰减已经开展了大量研究。Ashley等<sup>[2]</sup>发现污水污染物在旱季易发生沉积,且沉积物具有较高的有机性,TSS浓度也较高。Raunkjaer等<sup>[3]</sup>研究得出污水在一段5.2 km长的排水管道传输3 h时,有机物(以COD计)的去除速率最高为20 mg/(L·h)。桑浪涛等<sup>[4]</sup>发现流速小于0.6 m/s时,污水中颗粒态污染物的沉积作用大于冲刷作用。上述研究表明,生活污水在管网输送过程中污染物的衰减会受到运行流速、输送距离、输水水质等因素的影响。为了进一步确定沉积作用对生活污水污染物衰减的影响程度,笔者以居民源头排放的生活污水为研究对象,对污水污染物历时变化规律、污水与沉积物交互作用、污水水质组成变化趋势等开展了试验,并深入分析了污染物沉积对生活污水污染物收集处理效能的影响,以期在城市污水收集处理设施的提质增效工作提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原水来源与试验条件

试验污水取自华北地区某居民住宅楼宇排水管道出口,取样位置为化粪池之前。试验管道淤积底泥取自污水排放输送至污水处理厂过程中的某一段分流制污水管道。

为了排除其他因素对污水污染物沉积的影响,污水污染物沉积转化规律试验和污水与沉积物间

污染物沉积释放试验均采用静态试验的方式,模拟管网在较不利流态条件下污水污染物的迁移转化情况,保证试验在室温下避光进行,且不与空气直接接触。模拟测试管道直径为200 mm,污水和污泥深度分别为管道直径的60%和20%,试验装置见图1。

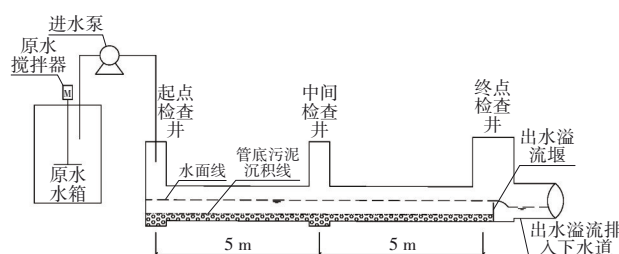


图1 污水管道模拟示意

Fig.1 Schematics of sewage pipeline simulation

污水污染物沉积转化规律试验将居民源头排放的生活污水进行静沉,测试污水水质变化情况;污水与沉积物间污染物沉积释放试验以实际管网底泥为沉积物,分别以自来水和居民源头生活污水为上覆水,测试上覆水水质变化情况。为保证试验结果稳定,每组试验均进行3次平行测试。

### 1.2 取样频次与测试方法

污水污染物沉积转化规律试验取初始阶段水样后,每间隔1 h取样1次,连续取样10 h,历时24 h后再取样1次,共取样12次。污水与沉积物间污染物沉积释放试验取初始水样和沉降10 h水样各1次,共取样2次。

主要监测水质指标为SS、COD、SCOD、BOD、TN、NH<sub>3</sub>-N、TP和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P,分析方法参考《水和废水监测分析方法》(第4版)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水污染物沉积转化规律

#### 2.1.1 SS历时变化

生活污水中SS的历时变化见图2。SS随沉积时间延长呈现出非常明显的沉降现象,0~6 h为快速沉降阶段,生活污水中SS浓度由146.7 mg/L降至67.3 mg/L,沉积率为54.1%,平均每个小时的沉积浓度值为13.2 mg/(L·h)。之后沉降速率减缓,当沉降时间达到10和24 h时,SS浓度分别降至57和41.3 mg/L,沉积率分别为61.1%和71.8%。

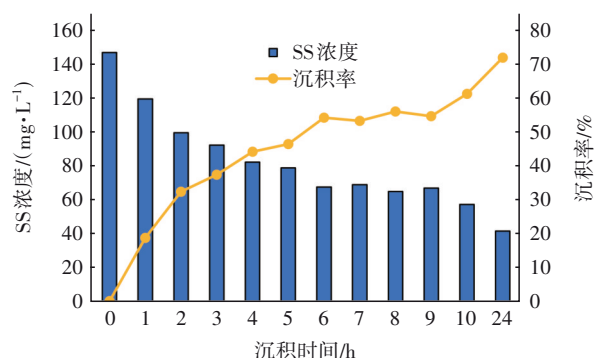


图2 污水中SS的历时变化

Fig.2 Diachronic change of SS in sewage

污水中的悬浮物指悬浮在水中的固体物质,主要包括不溶于水的无机物、有机物及泥砂等。生活污水中含有大量的颗粒态有机物,污水在管网中较长时间的沉降类似于污水处理厂的初沉处理过程,主要是悬浮固体沉降引起的颗粒态污染物浓度下降的过程,一方面导致污水中有机物浓度大幅度降低,另一方面也是管道沉积物大量积累的重要原因。

### 2.1.2 碳类污染物历时变化

生活污水中COD、SCOD的历时变化和COD的沉积率分别见图3和图4。

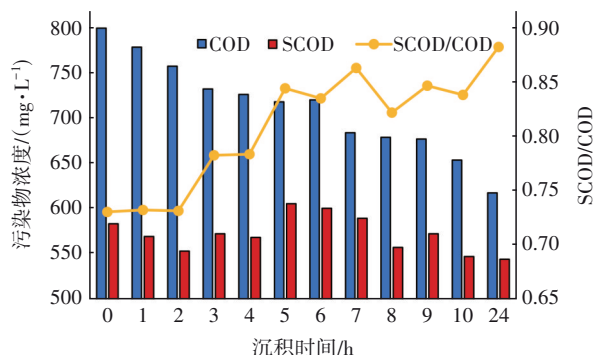


图3 污水中COD和SCOD的历时变化

Fig.3 Diachronic change of COD and SCOD in sewage

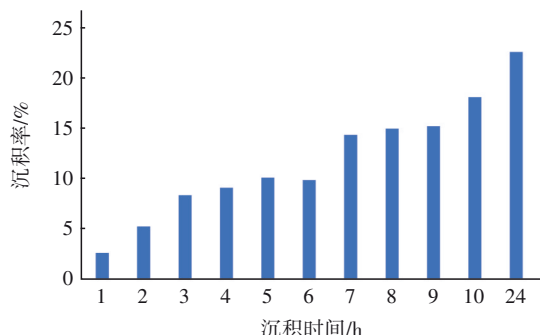


图4 污水中COD的沉积率

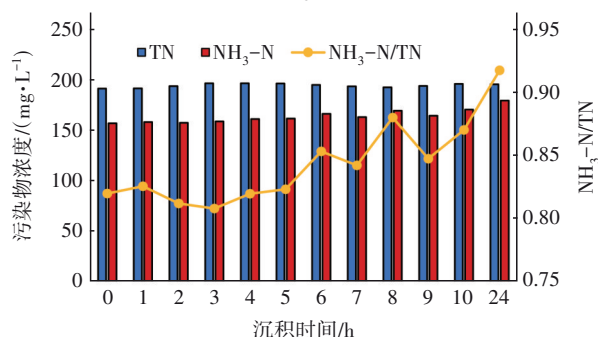
Fig.4 Deposition rate of COD in sewage

生活污水中COD随沉积时间延长呈现出明显的沉降现象,经过7 h的自然沉降,生活污水中COD趋于阶段稳定值,浓度由799.7 mg/L降至684.7 mg/L,沉积率为14.4%,平均每个小时的沉积浓度值为16.4 mg/(L·h)。之后沉降速率逐渐缓慢,当沉降时间达到10和24 h时,COD浓度分别降至654.5和618.3 mg/L,沉积率为18.2%和22.7%。与COD相比,SCOD变化幅度不明显,但仍呈现波动下降趋势,经过10 h左右的自然沉降,浓度由584.7 mg/L升高至606.3 mg/L,后又下降至548.7 mg/L。SCOD与COD的比值呈现出先升高、再降低、又升高的变化趋势,比值由0.73升高至0.86后有所降低,沉降至24 h时为0.88。

居民源头排放的生活污水含有较多的颗粒态物质,其在污水缓慢流动或静态条件下发生沉降,导致污水中的COD随沉积时间的推移而降低。而污水中SCOD为溶解态小分子物质,其浓度的变化既与颗粒态物质的沉积作用有关,也与大分子有机物的分解反应有关,在初始阶段随着污染物沉积呈略微降低趋势,伴随较长时间静沉,部分大分子有机物在厌氧条件下经水解酸化反应转化为小分子可溶解物质,SCOD又出现阶段性升高现象,但从整体变化趋势来看,当污水输送时间为10 h左右时,仍以污染物沉积作用导致的浓度降低为主。

### 2.1.3 氮类污染物历时变化

生活污水中TN和NH<sub>3</sub>-N的历时变化见图5。

图5 污水中TN和NH<sub>3</sub>-N的历时变化Fig.5 Diachronic change of TN and NH<sub>3</sub>-N in sewage

由图5可知,生活污水中TN随沉积时间延长变化不明显,在0~24 h的沉积过程中,浓度均在191.5~196.7 mg/L之间波动,最大波动差值为5.2 mg/L。NH<sub>3</sub>-N浓度随时间延长有一定程度的升高,6~7 h左右生活污水中的NH<sub>3</sub>-N趋于阶段稳定值,浓度由157.1 mg/L升高至166.4 mg/L,提升比例为

6.0%。当沉降时间达到10和24 h时,  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度升高至170.7和179.6 mg/L, 提升比例分别为8.7%和14.3%。由于  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度提升, 而TN波动不明显,  $\text{NH}_3\text{-N}$  与TN的比值由初始的0.82提升至0.87(10 h), 后又提升至0.92(24 h)。

城市生活污水中的氮主要来源于尿液、粪便、厨余垃圾和洗浴废水, 赋存形式主要为有机氮和氨氮, 大部分有机氮以尿素、蛋白质和氨基酸的形式存在, 而不稳定的有机氮容易在溶解氧浓度较低的管道环境中水解为溶解态有机氮, 进一步氨化为无机态的氨氮, 这也是氨氮浓度增加的主要原因。Qteishat等<sup>[5]</sup>在研究居民小区出口至污水处理厂输送过程中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度的变化时, 也得到相似结论。而TN浓度变化不明显的原因主要是系统未发生脱氮相关反应, 由于居民生活污水中硝态氮的浓度较低, 本次试验监测初始浓度约为0.5~1.3 mg/L, 反硝化反应在一定程度上受到基质条件的限制。

#### 2.1.4 磷类污染物历时变化

生活污水中TP和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的历时变化如图6所示。可知, 生活污水中TP随沉积时间延长有一定幅度的降低, 经过10 h的自然沉降, 生活污水中TP趋于稳定, 浓度由24.6 mg/L降至22.3 mg/L, 沉积率为9.3%。  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  随沉积时间延长变化不明显, 在0~24 h的沉积过程中, 浓度均在12.6~13.5 mg/L之间波动, 最大波动差值可达0.85 mg/L。生活污水中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  与TP的比值在0.5~0.6之间波动, 变化幅度

较小。

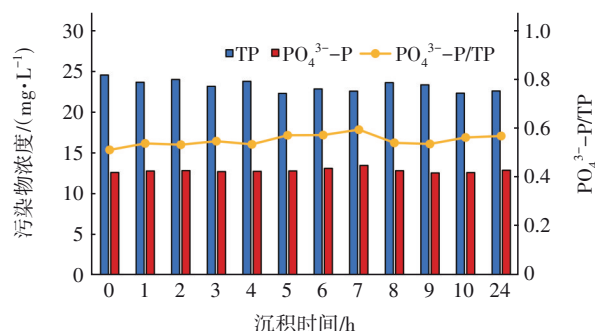


图6 污水中TP和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的历时变化

Fig.6 Diachronic change of TP and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in sewage

城市生活污水中磷的赋存形态主要为溶解态磷和颗粒态磷, 本研究中TP浓度的降低主要是由污水中颗粒态物质沉降所致, 而溶解态磷主要为磷酸盐, 受沉积作用的影响较小。除沉积作用外, 磷酸盐作为生物生长代谢所需的营养物质可被降解转化<sup>[6]</sup>。当污水中污染物经过较长时间的沉降淤积时, 淤泥中形成的聚磷菌会在厌氧条件下释放磷酸盐, 引起污水中磷类物质升高, 而本研究中污水的沉降时间较短, 尚未形成沉积底物, 不具备释磷反应条件。

#### 2.2 污水与沉积物间污染物沉积释放特性

为了进一步研究生活污水与沉积物间污染物沉积释放规律, 分别构建以自来水和生活污水为上覆水、管网底泥为沉积底物的模拟系统, 上覆水的水质变化情况见表1。

表1 不同上覆水水质变化

Tab.1 Quality change of different overlying water

项目	自来水+管网底泥				生活污水+管网底泥			
	初始浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	沉降10 h 浓 度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	变化幅度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	变化比例/%	初始浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	沉降10 h 浓 度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	变化幅度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	变化比例/%
COD	6.30	24.70	18.40	292	819.0	703.0	-116.0	-14
SCOD	2.40	16.70	14.30	596	629.0	595.0	-34.0	-5
TN	1.41	2.49	1.08	77	260.7	257.3	-3.4	-1
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.50	1.10	0.60	120	194.7	208.5	13.8	7
TP	0.17	0.24	0.07	41	28.0	25.5	-2.5	-9
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.04	0.06	0.02	50	14.6	15.1	0.5	3

注: 表中变化幅度和变化比例为正值时表示增长, 为负值时表示降低。

在以自来水为上覆水的系统中, 由于自来水初始水质较为干净, 上覆水污染物浓度增长较快, 但增长幅度不大, 经过10 h左右的自然沉降, COD、SCOD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的浓度分别增长了

18.40、14.30、1.08、0.60、0.07和0.02 mg/L。在以污水为上覆水的系统中, 上覆水污染物浓度的变化规律与2.1节污水中污染物的沉积规律基本一致, 经过10 h的自然沉降, COD、SCOD和TP的浓度分别



降低了116.0、34.0和2.5 mg/L,降低比例分别为14%、5%和9%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度提高了13.8 mg/L,TN和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 变化幅度不大。

由此可见,在以自来水为上覆水的系统中,上覆水污染物浓度有所升高,是沉积物中污染物向浓度较低的自来水中迁移释放所致;而在生活污水为上覆水的系统中,大部分污染物浓度降低,是污水中污染物沉积以及向沉积物中迁移所致。比较两个系统的数据可知,污水中污染物的降低幅度远超自来水中污染物的升高幅度,说明在没有外力扰动淤积底泥且污水在管网中处于缓流状态时,污水中污染物的沉积和迁移现象显著。

### 2.3 污水污染物沉积的影响

#### 2.3.1 对污水收集效能的影响

我国很多城市的排水管网受到不同程度沉积物淤积堵塞的影响<sup>[7]</sup>。管道沉积物淤积会导致管道的过水通量大幅度下降,严重影响污水污染物的收集输送能力,甚至出现污水外溢<sup>[8]</sup>、有毒有害气体释放<sup>[9]</sup>、地面塌陷等问题,对居民生产生活安全和城市环境质量造成威胁。

污水管网长期低流速运行对污染物浓度的影响,除了生活污水中污染物的沉积作用以外,管道中微生物群体对污染物的降解转化也是污水中有机污染物浓度降低的重要原因<sup>[10]</sup>。污水管道长期低流速运行导致污水中有机和无机颗粒物在管道底部逐渐积存,形成富含大量碳、氮、磷等营养物质的沉积基质结构,而城市排水管道中黑暗、低氧的环境为厌氧和缺氧微生物菌群创造了良好的生存条件。因此,在污染物长时间积存和污水长距离输送情况下,微生物的生长代谢引起管道污水污染物的浓度变化也是不可忽略的<sup>[11]</sup>。

#### 2.3.2 对污水处理效果的影响

城市污水中的碳源比例对污水处理厂工艺的稳定运行起到至关重要的作用,我国污水处理厂为使出水达标往往需要投加大量碳源以满足脱氮除磷需求<sup>[12]</sup>,碳氮比失调问题十分明显。为确定污染物在管网输送过程中沉积衰减对进水污染物成分的影响,假设管网污水转输流速低于0.3 m/s,考虑我国污水管网的输送距离一般较长,以输送距离为10 km左右计,污水从居民楼宇排放至污水处理厂大概需要9.26 h,本研究按照沉积时间为10 h进行测算。

生活污水中COD/TN、COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD/TP和COD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的历时变化见图7和图8。经过10 h的沉降,COD/TN由初始的4.17下降至3.34,COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$ 由初始的5.09下降至3.83,下降比例分别为19.9%、24.8%;COD/TP由初始的32.5下降至28.62,COD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 由初始的63.3下降至51.9,下降比例分别为11.9%、18.0%。试验结果表明,与居民源头排放的生活污水相比,较长时间的沉积会导致污水的碳氮比、碳磷比下降。

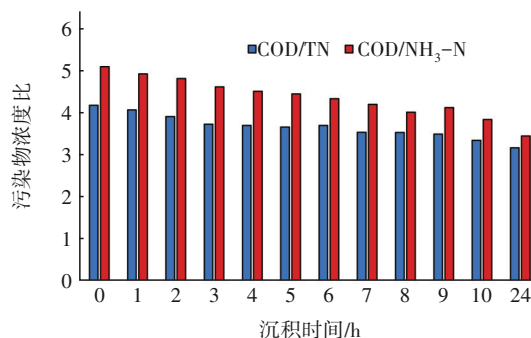


图7 污水COD/TN和COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$ 的历时变化规律

Fig.7 Diachronic change of COD/TN and COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$  in sewage

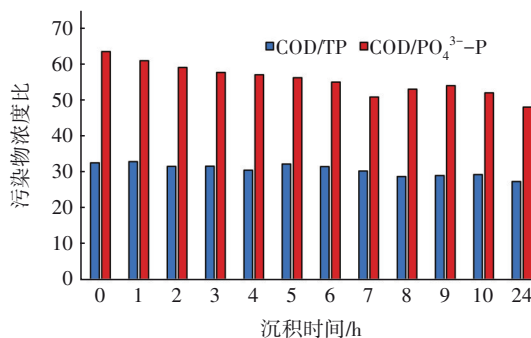


图8 污水COD/TP和COD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的历时变化规律

Fig.8 Diachronic change of COD/TP and COD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in sewage

深入分析可知,当污水管网长时间在较低流速下运行时,污水中大量颗粒态、悬浮态污染物沉积在管底,COD、BOD等有机物随着颗粒态物质沉积,管底沉积物和缓流污水中的有机氮在厌氧或缺氧条件下发生水解酸化反应释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,淤积底泥中的微生物发生厌氧释磷反应释放 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等磷类物质。这导致污水中COD在经历较长输送时间后明显降低,而氨氮、磷随着输送时间延长不断攀升,这也是污水在低流速状态下碳氮比、碳磷比明显下降的主要原因,进而引起污水处理厂进水水质出现低

碳高氮磷的问题,对生物处理所需的碳源供给产生不利影响,增加污水处理成本,造成资源浪费。

### 3 结论

① 居民源头生活污水污染物水质受沉积作用影响显著,经过10 h的自然沉降,沉积衰减作用导致的颗粒态有机物浓度降低较为明显,污水中SS、COD和TP的浓度分别下降了61.1%、18.2%和9.3%,而污水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度提高了8.7%。

② 在没有外力扰动淤积底泥且污水处于静状态时,污水中污染物的沉积和迁移现象显著。

③ 以污水在低流速状态下输送10 h测算,污染物沉积作用导致污水中COD/TN、COD/ $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD/TP和COD/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别降低了19.9%、24.8%、11.9%和18.0%,揭示了我国很多城市排水管网的长期低流速运行是导致污水处理厂进水碳氮比、碳磷比失调的重要原因。

### 参考文献:

- [1] 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).
- [2] ASHLEY R, CARBTREE R W. Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems[J]. Water Science & Technology, 1992, 25(8): 1-12.
- [3] RAUNKJAER K, HVITVED-JACOBSEN T, NIELSEN P H. Transformation of organic matter in a gravity sewer [J]. Water Environment Research, 1995, 67 (2): 181-188.
- [4] 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).
- [5] QTEISHAT O, MYSZOGRAJ S, SUCHOWSKA-KISIELEWICZ M. Changes of wastewater characteristic during transport in sewers [J]. WSEAS Transactions on Environment and Development, 2011, 7 (11): 349-358.
- [6] MULKERRINS D, DOBSON A, COLLERAN E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters [J]. Environment International, 2004, 30 (2): 249-259.
- [7] 汤霞, 陈卫兵, 李怀正. 城市排水系统沉积物特性研究 [J]. 环境科学与管理, 2013, 38(3): 55-58.  
TANG Xia, CHEN Weibing, LI Huaizheng. Research progress on characteristics of sewer sediments in urban sewer system [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(3): 55-58(in Chinese).
- [8] AHYERRE M, CHEBBO G, SAAD M. Sources and erosion of organic solids in a combined sewer [J]. Urban Water, 2000, 2(4): 305-315.
- [9] 许小冰, 王怡, 王社平, 等. 城市排水管道中有害气体控制的国内外研究现状[J]. 中国给水排水, 2012, 28 (14): 9-12.  
XU Xiaobing, WANG Yi, WANG Sheping, et al. National and international research on control of harmful gases in municipal drainage pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(14): 9-12(in Chinese).
- [10] JIANG G M, GUTIERREZ O, YUAN Z G. The strong biocidal effect of free nitrous acid on anaerobic sewer biofilms [J]. Water Research, 2011, 45 (12): 3735-3743.
- [11] JENSEN H S, BIGGS C A, KARUNAKARAN E. The importance of sewer biofilms [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews-Water, 2016, 3(4): 487-494.
- [12] 韦启信, 郑兴灿. 影响污水生物脱氮能力的关键水质参数及空间分布特征研究[J]. 给水排水, 2013, 39 (9): 127-131.  
WEI Qixin, ZHENG Xingcan. Study on the key wastewater quality parameters influencing wastewater biological denitrification ability and their spatial distribution characteristics [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(9): 127-131(in Chinese).

作者简介:高晨晨(1986-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士,高级工程师,主要研究方向为城镇排水、污水处理的政策与技术。

E-mail:hellogcc@126.com

收稿日期:2022-05-31

修回日期:2022-07-22

(编辑:沈靖怡)