

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.24.006

## 城市排水管道沉积物与污水间物质转移转化研究进展

王 健, 刘国华, 齐 鲁, 邵宇婷, 王 悦, 何元浦, 王洪臣  
(中国人民大学环境学院 低碳水环境技术研究中心, 北京 100089)

**摘 要:** 城市排水管网是收集、输送污水的重要环节。由于水力条件以及降雨冲刷的影响, 排水管道底部极易沉积沉积物, 而污水以及沉积物中含有丰富的营养物质而且赋存有大量微生物, 致使管道污水以及沉积物中存在各种复杂的物理、生化等反应, 易引发沉积物与污水之间的物质转移转化。沉积物和污水之间主要存在污染物物理沉积、生物转化吸附和生物转化释放三种物质交换途径, 由此会造成管道淤积堵塞、有毒有害气体释放、管道腐蚀以及污水处理厂碳源不足等危害。首先综述了城市排水管网中沉积物的产生规律及构成特征, 而后进一步分析了沉积物与污水之间的物质转化规律、影响因素和机制, 以及由此造成的影响和危害, 并对我国排水管道中沉积物和污水之间的相关研究提出了期望。

**关键词:** 排水管道; 沉积物; 污水; 微生物; 物质转化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)24-0034-11

### Research Progress in Material Transformation between Sediment and Sewage in Urban Drainage Pipeline

WANG Jian, LIU Guo-hua, QI Lu, SHAO Yu-ting, WANG Yue, HE Yuan-pu,  
WANG Hong-chen

(Research Center of Low Carbon Water Environment Technology, School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Urban drainage pipe network plays a very important role in urban sewage collection and transport. Due to the influence of hydraulic conditions and rainfall erosion, sediments are easy to deposit at the bottom of the drainage pipeline. And sewage and sediments are rich in nutrients and host a large number of microorganisms, which is prone to inducing complex physical and biological reactions, thus cause material transfer and conversion between the sediment layer and sewage. Physical deposition, biological transformation adsorption and biological transformation release of pollutant are three main kinds of transfer and conversion ways, which result in many harms such as pipeline silting and blocking, the release of toxic and harmful gases, pipeline corrosion, carbon source loss, etc. This paper summarized the production law and composition characteristics of sediments in urban drainage pipelines, as well as the material transfer and conversion law, effect factors, mechanism, and harms. Finally, the research related to the transfer and conversion between the sediment layer and the sewage of drainage pipeline in China was suggested.

基金项目: 中国人民大学科学研究基金资助项目(2020030257)

通信作者: 刘国华 E-mail: lgh@ruc.edu.cn

**Key words:** drainage pipes; sediments; sewage; microorganisms; material conversion

## 1 研究背景

城市排水管道系统发挥着污水和雨水收集以及输配送的作用,是城市建设的重要基础设施,排水系统的好坏直接影响城市景观和环境卫生,并制约城市的发展水平。近年来,排水管道堵塞、气味和腐蚀问题影响了城市管道的正常运行,下水道系统中发生的物理、化学以及生物反应,如沉积物积聚(堵塞)和生物分解(气味和腐蚀)引起了人们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。

污水流经排水管道时,污染物的含量和组成均会发生变化。排水管道对污染物的削减作用主要包括污染物的物理沉积和微生物对污染物的消耗转化,由于生活污水中含有大量颗粒态的有机物,沉积作用对污水中污染物去除的贡献率较大<sup>[3]</sup>。过去,对排水管网的研究多聚焦于管道内颗粒态污染物的沉降、冲刷以及管道沉积物的积累、迁移<sup>[4]</sup>,而近年来的研究表明,在长时间、长距离的输送条件下,微生物降解对管道污水中污染物浓度变化的影响也是不可忽略的。在城市排水管道中,生活污水中含有丰富的碳、氮、磷等营养物质,为微生物的生长提供了有利条件,大量微生物菌群聚集形成生物膜黏附在管壁上,以絮体形态悬浮在污水中或以底泥形式沉积在管道底部。研究表明,附着在排水管道上的生物膜对污水中的污染物转化具有不可忽视的影响<sup>[5]</sup>。城市排水管道处于黑暗和无氧环境中,并且污水中沉积的大量颗粒物可以诱导下水道沉积物中基质的积累,导致下水道沉积物发生厌氧反应而生成硫化物和甲烷<sup>[1]</sup>。

由于我国排水管网系统在设计、运行、管理及维护中存在诸多问题,城市排水管网普遍存在沉积物淤积堵塞现象。管道沉积物淤积会大大降低管道的过水通量,导致污水外溢等问题,不仅对居民的日常生活和出行产生了严重影响,更加速了城市水生态的恶化。由于排水管道中适宜的环境和污水的持续排入,促进了微生物的生长,因此沉积物中易发生各种复杂的反应,从而引起污水中碳源消耗以及有毒有害气体的产生。综述了城市排水管道沉积物的产生规律及构成特征,沉积物与污水之间的污染物转移转化过程、影响因素和机制,以及沉积物与污水之间污染物转移转化造成的影响及危害,并针对排水

管道沉积物现阶段研究的不足提出展望。

## 2 排水管道沉积物的产生规律及构成特征

### 2.1 沉积物的产生规律

合流制排水管道沉积物来源广泛,根据其产生的原因,可分为雨水冲刷带入管道的沉积物和随污水排入管道的沉积物。研究<sup>[6]</sup>表明,每天每米长的下水道中大约会沉积 30 ~ 500 g 的颗粒物质,这些颗粒物质就是组成下水道沉积物的主要部分。污水中颗粒物的沉积也需要一定的条件,主要分为以下几个方面:①水力条件,如低流量或低降雨量;②材料,如密度大的颗粒;③结构,如管道或颗粒物表面粗糙度;④运行条件,如水流排放阻力。因此,沉积物的形成过程主要是依靠颗粒物的沉积以及沉积物表面的吸附作用,其产生量则主要受污水中颗粒物组成及性质、排水体制、管道性质、沉积物表面粗糙程度、水力条件等的共同作用影响。

### 2.2 沉积物的构成特征

排水管道沉积物主要由进入排水管道的污水和雨水中的有机和无机颗粒物沉积形成,在一定条件下,这些颗粒物可在排水管道底部沉积进而形成管道沉积物。管道沉积物不只由固体颗粒组成,还含有大量的厌氧和缺氧微生物,共同组成排水管道沉积物。Ahyerre 等<sup>[7]</sup>在 150 m 的下水道长度上分析了不同类型沉积物的污染物负荷和质量,认为沉积物可归为三类,从下到上分别为粗颗粒沉积物 (GBS)、有机层 (OL) 和生物膜 (Biofilm),其性质见表 1。

表 1 沉积物的组成部分及其性质

Tab. 1 Sediment components and their properties

组成部分	性质
GBS	主要位于排水管道的底部,表现出较强无机特性,呈黑灰色,颗粒物较粗,直径为 mm 级,在管道沉积物中所占比例最大
OL	主要覆盖于 GBS 的上方,由细小颗粒构成,呈棕色,表现出很强的生化特性,冲刷进入自然水体后具有潜在的污染危害
Biofilm	通常形成于水面附近的管壁上,当一段时间内沉积床不被干扰时,也会在沉积物的表层形成,主要由覆盖在有机质上的微生物层构成。在好氧和厌氧条件下,可观察到 Biofilm 在沉积床上的生长,其中细菌数量接近活性污泥,具有很强的活性

当前我国城市排水管网多为合流制,降雨冲刷

带入和居民生活产生的污染物均会排入合流制管网。因此,排水管道内沉积物中赋存的污染物种类很多,其种类和来源如表 2 所示。

表 2 排水管道内沉积物中赋存的污染物种类及来源

Tab. 2 Types and sources of pollutants present in sediments in drainage pipe

种 类	来 源
易降解的有机物、氮、磷	人类生活产生的废弃物和排泄物
难降解的油类、脂类物质,带有毒性的油烃(PHC)和多环芳烃(PAHs),以及 Pb、Cr 等致癌、致畸、致突变重金属物质	汽车尾气的排放、轮胎的磨损、汽油不完全燃烧,以及燃料和润滑油的泄漏等

根据排水管道的类别、所处地理方位、服务区域特征、运行情况等,排水管道沉积物的特征也存在很大差别。若将城市排水管道沉积物的性质分为物理、化学、生物三类,其物理性质主要包括颜色、粒径分布、密度、臭味、含水率等;化学性质主要为有机、无机质组分及含量等;生物性质主要是微生物及其组成。

排水管道中沉积物的分布受管道所处的地理方位、管道中水力条件等的影响。通过监测和分析排水管道中沉积物沿程的变化情况,研究人员发现在管道坡度变化处、管道连接处和管道拐弯处更有利于颗粒物沉积;旱季沉积物从入水口开始从上游到下游逐渐形成,沉积物的厚度从上游到下游逐渐减小,导致沉积物为水流创造了一个新的坡度,从而引起水力条件的改变。监测还发现从上游到下游沉积固体的尺寸和密度随所运输颗粒物的特性变化和局部水力条件的降低而降低。

沉积物的物理化学性质及其赋存的污染物与其排放污水所处的功能区息息相关。杨云安等<sup>[8]</sup>通过分别采集某市老城区的四种功能区(校区、生活小区、服务区和广场)的污水管道和雨水管道沉积物,对其密度、粒径等进行了研究,结果表明沉积物的密度随无机物相对占比的增加而增大,无机物成分占比的提高能增大沉积物密度,进而提高颗粒物的沉降性能。研究人员实地调研发现,在餐饮行业密集的区域,由于排放的污水有机质含量高,排水管道中沉积物呈较深的黑褐色或灰色,而且有机物腐败产生的臭味明显;对于新建居民区、办公楼排水管道,由于施工等原因沉积物则呈现土黄色,泥沙含量高,有机质含量低,组分主要为无机颗粒。Ashley

等<sup>[9]</sup>的研究发现,城市工业集中的区域沉积物中重金属含量明显高于其他地区,而且在马路密集、车流量大的区域,沉积物中也含有较多的重金属;商业区、居民区、校区合流排水管道沉积物组成差别不大,其中有机组分占比较大,COD 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  分别可达 200 g/kg 和 0.2 g/kg;与城市中心区域相比,非中心城区沉积物中有机污染物浓度相对较高。由此可知,沉积物中污染物的组分及含量与管道服务区域的特征有很大相关性。

合流制与分流制管道中沉积物的组成也存在差异。研究表明,合流制管道湿沉积物中 COD 含量为 42.69 g/kg,其含水率为 27.5%,相当于 58.88 mg/g 干沉积物;分流制污水管道湿沉积物中 COD 含量为 214.1 g/kg,其含水率为 25.9%,相当于 288.8 mg/g 干沉积物。由此可见,相比于单纯分流制污水管道,合流制管道中 COD 含量较小,同时沉积物含水率对管道中污染物可生化特性也有较大影响。

### 3 沉积物与污水间的污染物转移转化特性

#### 3.1 沉积物与污水间的物质转化过程

在排水管道这样一个相对密闭的环境中,由于气、液、固三态物质以及微生物的存在,会发生沉积、释放以及微生物降解消耗作用,其中沉积过程主要是液相中颗粒物在重力作用下沉积到管道底部,而释放过程主要包括微生物代谢释放和沉积物中污染物受水力冲刷而释放,微生物的降解消耗主要包括排水管道中硫酸盐还原菌(SRB)、产甲烷菌(MA)等微生物的代谢过程。总之,在液相、沉积相和气相中发生着各种复杂的反应。

根据排水管道物质转化过程分析,Shi 等<sup>[10]</sup>首次提出了物理沉积、生物转化吸附和生物转化释放三种污染物交换途径。由于沉积物表面粗糙且存在大量孔隙,因此污水和生物膜中微生物群落降解的污染物可被沉积物吸附(这种污染物交换途径被称为生物转化吸附)。随着污染物物理沉积的进行,沉积物中存在的微生物群落可以诱导污染物降解并将小污染物分子释放到污水中(这个过程被称为生物转化释放)。三种污染物交换途径同时存在,会对管道自身、周围环境以及下游污水处理厂产生严重的影响。

排水管道沉积物中的反应条件与厌氧废水处理系统相同,微生物代谢过程会导致污水和沉积物中可降解污染物的积累,其中多种物质会被分解转化。



因此,可以认为在下水道沉积物中也可能发生类似的厌氧生物反应。这些微生物转化反应主要涉及硫和有机物,它们主要发生在与液相、生物膜和沉积物相关的缺氧和厌氧区域。Shi等<sup>[10]</sup>通过实验分析得出,微生物群落的代谢在沉积物中相较于污水中更加活跃。

研究者采用分子生物学手段分析了混凝土管道中沉积物表面生物膜层的微生物丰度,发现该层中的细菌量为 $2.1 \times 10^{11}$ 个细胞/g干质量,接近于活性污泥中细菌的数量。还有人实验室3 m长的管道污水长期采样并分析,发现存在于管壁上的生物膜以及悬浮的微生物对污水中有机物的去除有着较大影响。金鹏康等<sup>[11]</sup>通过模拟管道中的水质变化特征,得出在6 h的水力停留时间下,由于微生物降解以及沉积作用,污水中总有机物的去除率为10.79%,而生物降解作用的贡献率可达31.15%。由此可见,管道中液相、生物膜以及沉积物对污水运输过程中污染物的迁移转化起着非常重要的作用。

李海燕等<sup>[12]</sup>通过实验模拟手段发现,流速显著影响管道沉积物中的磷向污水中释放,而且进一步得出流速与磷释放呈正相关关系。桑浪涛等<sup>[13]</sup>对不同流速下管道污水中TCOD、TN、TP在不同粒径段的分布特征进行了研究,发现TCOD主要分布在5~100  $\mu\text{m}$ 粒径段,而TN、TP主要分布在0~5  $\mu\text{m}$ 粒径段。可见,流速对沉积物中碳、氮、磷等的释放也存在一定影响。进一步研究发现,沉积物沉积的边界流速为0.6 m/s,小于此值时颗粒物不断沉积于管道底部,大于此值时赋存在沉积物中的污染物随沉积物迁移释放。因此,物理冲刷、迁移与沉积也是造成管道沉积物与污水之间物质交换的重要原因。

### 3.1.1 污水污染物进入沉积物中的过程

污水中污染物进入沉积物过程主要由颗粒物的沉积作用以及沉积物的吸附作用引起。在合流制管道中由降雨引起的雨水冲刷导致地表污染物随雨水进入下水道,在重力作用下沉积到管道底部,形成管道沉积物,或者是人为排放的生活污水中含有的粪便等颗粒物进入管道后沉降形成管道沉积物。同时,由于沉积物表面粗糙且存在大量孔隙,因而污水和生物膜中微生物群落降解的污染物可被沉积物吸附,进而从污水中转移到沉积物中。

Shi等<sup>[10]</sup>通过建立对照试验(禁止生物膜或沉

积物中的微生物活动)来量化物理作用和生化作用对污染物交换的影响。结果表明,有机物、氮和磷等的物理沉积途径占污水中污染物减少量的70%以上,这表明物理沉积是下水道中污染物的主要交换途径。Shi等<sup>[14]</sup>又根据排水管道中微生物菌群分析发现,沉积物中硝化和聚磷酸盐细菌的多样性较低,并且检测结果显示这些微生物群落与氮和磷污染物的相关性较低,这也表明氮和磷污染物在沉积物中的富集主要由物理沉积过程引起。

Yin等<sup>[15]</sup>研究了改良的湖泊沉积物对磷的吸附作用,结果表明,改良的沉积物可以通过吸附作用大大降低湖泊中的磷浓度,包括化学吸附以及物理吸附。因此,管道沉积物同样会吸附污水中的污染物,实现污水中污染物到沉积物的转移。Shi等<sup>[10]</sup>通过对比真实污水和真实沉积物与灭活污水和真实沉积物对污水中污染物的影响,发现对于TCOD、总氮等指标,前者TCOD、总氮浓度变化分别为159.0、4.41 mg/L,后者TCOD、总氮浓度变化分别为104.8、3.36 mg/L,两者的TCOD、总氮差值代表了生物转化吸附作用的影响,最终得出实际下水道污水输送过程中存在生物转化吸附过程的结论。

污水污染物进入沉积物的过程中,物理沉积发挥的作用远大于生物转化吸附。因此许多研究人员对管道沉积物的沉积进行模拟,进而得到了经验模型,如有学者通过对法国里昂的一条合流制排水管道进行4年的实地监测和分析,提出了一个管道沉积物在旱天时的沉积模型:

$$V(t) = V_{\max} [1 - e^{-k(t-t_0)}] \quad (1)$$

式中: $V(t)$ 为沉积物在 $t$ 时刻的沉积量, $\text{m}^3$ ;  $t$ 为沉积截止时刻,d; $V_{\max}$ 为最大沉积物的体积, $\text{m}^3$ ;  $k$ 为沉积参数, $\text{d}^{-1}$ ;  $t_0$ 为沉积发生的起始时刻,此时沉积物体积以0计。

尽管根据沉积模型可以大体上判断排水管道中沉积物的沉积规律,但是由于各地区天气和排水体制存在较大差异等原因,很难对不同地区以及不同影响因素情况下的沉积规律进行模拟。因此,对不同地区不同情况建立具有针对性的模型或对原有模型进行优化是未来研究沉积物沉积规律的重要方向。

### 3.1.2 沉积物中污染物进入污水的过程

污染物从沉积物进入污水中主要涉及两个过程,第一个为由雨水冲刷、居民用水习惯等引起的水

力变化,导致沉积物中的污染物会被再次冲刷释放到污水中,此过程为物理冲刷引起的污染物的释放;第二个是微生物代谢产生的有机物以及其他物质由于在沉积物中的浓度远高于污水,因此会顺浓度梯度进入管道污水中。

研究<sup>[16]</sup>表明,排水系统水流中 60% 的悬浮物(SS)和 COD 来自沉积污染物的再悬浮释放,而导致其再悬浮释放的主要原因是管道中污水水力条件的突变。另外,研究<sup>[17]</sup>发现,由于受到床层水力阻力的影响,泥水交界处会富集大量污染物,当床层受到的剪切应力超过  $1.1 \sim 1.2 \text{ N/m}^2$  时,观察到了沉积物中污染物向污水释放的现象。因此,水力条件的变化会导致管道沉积物中赋存的污染物再悬浮进入污水中。

由于微生物的存在,下水道沉积物中的大分子有机物可通过水解变成小分子有机物,不仅污水系统中的多种功能性微生物群落可以降解氮和硫等,而且沉积物中也含有丰富的微生物群落,可消耗底物产生的甲烷和硫化氢。研究<sup>[18]</sup>证明,排水管道沉积物中存在一定量的产生硫化物和甲烷的微生物,而且根据产甲烷过程和硫酸盐还原过程中消耗的乙酸和丙酸,推断下水道沉积物中产甲烷菌和硫酸盐还原菌可利用的有机小分子可能十分丰富。因此,沉积物中的有机物可通过微生物转化过程重新进入污水。Shi 等<sup>[10]</sup>的研究也发现,生物转化释放的污染物交换量是生物转化吸附的两倍以上(有机物为  $39.2 \text{ mg/L} > 14.7 \text{ mg/L}$ ;氮污染物为  $1.79 \text{ mg/L} > 0.85 \text{ mg/L}$ ;磷污染物为  $2.12 \text{ mg/L} > 1.01 \text{ mg/L}$ )。通过对比仅有污水以及存在污水和沉积物两种情况下模拟的下水道沿程 61 d 的 VFA 变化,发现在下水道流动过程中,下水道中无沉积物的污水中 VFA 浓度每天平均增加  $10.7 \text{ mgCOD/L}$ ,即生物膜和污水中的微生物群落将消耗有机大分子来产生 VFA;下水道中有沉积物的污水中 VFA 浓度每天平均增加  $20.3 \text{ mgCOD/L}$ ,该值远大于  $10.7 \text{ mgCOD/L}$ 。这些结果表明,沉积物中生物降解过程产生的 VFA 又释放转移到污水中。而且发现沉积物中多种可降解污染物的浓度远高于污水中的浓度,由于浓度差异,污染物也可以从沉积物释放到污水中<sup>[19]</sup>,这也是沉积物中污染物进入污水的重要途径。

许多研究<sup>[4,10]</sup>表明,生物转化释放过程是造成污水中污染物结构变化的主要生物反应,污水中存

在的颗粒污染物以及管道底部沉积物都可通过不同的微生物作用转化为可溶性物质。由于管道中黑暗厌氧的环境,所以在沉积物的所有区域中发酵反应是主要的过程,其会诱导颗粒污染物的水解和分解,进而实现污染物从沉积物向污水的转移。

有机物在排水管道中的厌氧反应过程与厌氧反应器类似,主要分为以下五个阶段(见图 1):分解、水解、酸生成、乙酸和硫酸盐生成、气体生成。每个阶段都会产生不同的中间产物和最终产物,所以污染物从沉积物到污水中的转化,可以发生在厌氧反应过程中的任意一阶段。而且由于浓度差异,沉积物中厌氧过程产生的阶段性或最终产物会转移到污水中。

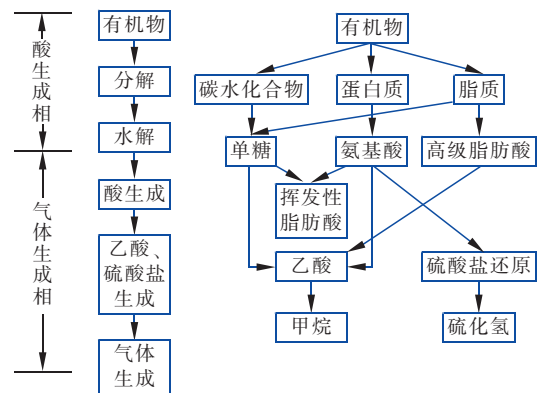


图 1 厌氧反应阶段以及对应的有机物转化过程

Fig. 1 Anaerobic reaction stage and corresponding organic matter conversion process

### 3.2 沉积物与污水间污染物转移转化影响因素

排水管道中沉积物与污水之间的污染物转移转化主要涉及物理作用和生物作用,物理作用主要是指颗粒物的沉积,由于管道中水力波动造成污染物的再悬浮、转移、挟带等;而生物作用则主要是指存在于粗糙的管壁上,或以絮体形态悬浮在污水中,以底泥形式沉积在管道底部的大量微生物菌群通过自身的生长代谢而引起的污染物的转移转化过程。因此,对应于沉积物与污水之间污染物转移转化的影响因素的研究主要针对这两方面。

#### 3.2.1 物理过程影响因素

影响排水管道沉积物物理转移转化过程的因素有许多,包括管道性质、水力状况、排水体制等,其均会对排水管道沉积物的沉积规律产生影响。具体的排水管道沉积物沉积的影响因素与影响方式如表 3 所示。

表 3 排水管道沉积物沉积的影响因素与影响方式  
Tab.3 Influence factors and influence methods of sediment deposition in drainage pipelines

影响因素	调查结果	影响方式
坡度	张伟等 <sup>[20]</sup> 对广州排水管道进行调研,通过计算新河浦涌南北岸排水管道的加权平均坡度并观测其沉积状况,发现南岸加权平均坡度远小于北岸,且南岸沉积现象较明显	相同性质的颗粒物有属于自己的滑动角,因此管道坡度对沉积物沉积有较大影响,而且坡度直接影响污水在管道中的流速
管径	张伟等 <sup>[20]</sup> 对广州排水管道进行调研发现,对于管径 < 1 200 mm 的管道,随着管径的增大,沉积物厚度及沉积量上升趋势明显	当流量、坡度一定时,管径增大,水流与管道的接触面积变大,因而沉积物厚度、沉积量与管径呈正相关关系
材质	调研区域管道材质主要为钢筋混凝土管和 PVC 管,不同材质管道的粗糙系数不同,管道内水流速存在差异,钢筋混凝土管沉积物量较多 <sup>[20-21]</sup>	由于两种材质管道的粗糙系数不同,因此摩擦阻力存在差异,显然,粗糙系数较大更易积累沉积物
汇水区域性质	研究区域包含老式小区、商业区、校园、新建小区、写字楼等多种城市典型功能区。经调查,沉积状况分布规律是:老式小区 > 商业区 > 写字楼 > 路面 > 校园 > 新建小区 <sup>[20-21]</sup>	各汇水区域排水规律不同。老式小区人口密集,环境卫生差,大部分雨水口被当作垃圾倾倒口,排水管道铺设年代久远,缺乏维护管理,商业区人流量大,产生垃圾总量也相对较大
排水体制	排水体制主要分为分流制和合流制,调查区域内沉积状况为:分流制雨水管道 > 合流制管道 > 分流制污水管道 <sup>[20-21]</sup>	其原因是随雨水进入排水管道的颗粒物远多于生活污水,而单纯分流制雨水管道受降雨影响很大,阶段性降雨易造成沉积物大量沉积
流速	桑浪涛等 <sup>[13]</sup> 调查发现:当流速 < 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,当流速 > 0.6 m/s 时,水流冲刷强度增大,沉积物易被冲刷挟带	排水管道中流速与水流剪切力息息相关,流速越大,水流剪切力越大,因此流速与沉积物沉积量呈负相关关系

Ashley 等<sup>[9]</sup>研究发现,在无降雨冲刷情况下,沉积相与水相交界面处会形成一种被称为高密集流的高浓度活动层,活动层内的固体颗粒粒径约 0.5 mm,表现出较高的有机性(有机物占比约 90%)和较好的可输运特征(TSS 浓度最大可达 3 500 mg/L)。经过不同的验证发现,随着时间的延长,底泥高度并不是稳定增长的,而是会受到进水水质、水力条件等的影响。但是,在其他条件保持稳定的情况下,底泥高

度可以达到一个稳定状态,也就是沉积与冲刷过程达到动态平衡。

3.2.2 生物过程影响因素

由于当前的管道生产、埋设以及检修手段存在一定局限性,排水管道中污水运输的条件无法始终保持稳定状态。如图 2 所示,空气的进入、温度的变化、pH 值的改变以及流速的变化等均会影响污水管道中微生物的分布及其代谢速率和代谢途径,进而影响管道中物质生物转移转化过程。

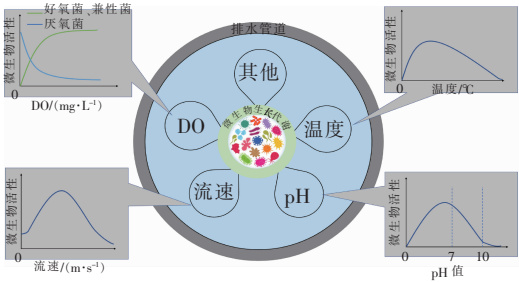


图 2 排水管道中影响微生物生长代谢的因素及其影响规律  
Fig.2 Factors affecting microbial growth and influence metabolism in drainage pipelines

① 溶解氧(DO)

重力流管道中一般含有 0 ~ 5 mg/L 的 DO,压力流管道则处于完全厌氧的条件。在重力流污水管道中,借助污水输送过程,空气可以被流动的废水夹带进入排水管道,或者在检查井处进入排水管道,这些均可能使管道污水 DO 升高。排水管道中复杂的动态过程有助于在空间或时间维度内形成排水管道内的好氧和厌氧交替过程。在废水输送过程中由于厌氧-缺氧-好氧条件的转化,不同的优势微生物群落会使管道中发生各种不同的生物转化过程,该过程会产生许多不同的物质,如硫化氢、甲烷、二氧化碳等。由于 DO 对排水管道中硫和碳的生物化学反应过程有着重大影响,许多研究者已经就空气和氧气对硫化物的形成和排放以及下水道中碳循环的影响进行了研究。

由于 SRB 以及 MA 均属于厌氧菌,因此对下水管道曝气充氧可大大抑制 SRB 以及 MA 的活性,进而抑制硫化氢和甲烷的产生。氧气的添加可以以空气或纯氧的形式进行,其目的在于维持废水中的好氧条件。如果在水道生物膜周围存在溶解氧,则会发生硫化物的化学和生物氧化,从而使硫化氢不以气体形式排放,反之,如果没有氧,则溶解的硫化物将从生物膜转移到废水中,并以硫化氢的形式存在



或散逸到气相中。Liu 等<sup>[22]</sup>的研究表明,液体中溶解氧的变化显著影响了硫和碳的生化反应过程,而且厌氧和缺氧与低溶解氧的频繁交替可以有效抑制硫化物的积累,同时减少污水系统中的碳损失。Vollertse 等<sup>[23]</sup>分析了 DO 对沉积物水解的影响,采用短期 DO 对沉积物氧摄入速率(OUR)的影响作为评判指标来评价 DO 对下水道沉积物水解过程的影响。结果显示,DO 在 0 ~ 8 mg/L 范围内,OUR 随 DO 呈现先增加后稳定的趋势。因此,可以得到 DO 对沉积物水解速率的影响存在一个饱和点,达到饱和点后,再增加 DO 浓度,反应速率趋于稳定。

总之,DO 对排水管道中微生物的菌群结构以及微生物新陈代谢均会产生较大的影响。较高的氧浓度会抑制厌氧菌(如 MA 和 SRB)的生长,但是会促进好氧菌以及兼性菌的增长,进而增加碳源消耗。因此,排水管道中氧浓度的变化会对有毒有害气体控制以及污水处理厂进水水质调控产生较大影响。

#### ② 温度

参照《建筑给水排水设计规范》(GB 50015—2003,2009 年版)中 4.3.2 部分,小区干道和小区组团道路下的管道,覆土深度不宜小于 0.7 m,生活污水接户管道埋设深度不得高于土壤冰冻线以上 0.15 m,且覆土深度不宜小于 0.3 m。所以在排水管道中由于埋深、外部气候以及内部排水的影响,排水管道中的污水温度也会随之发生变化。研究显示,在一条 5 km 长的截污重力下水道的运输过程中,污水温度下降高达 3.5 ℃。

有研究发现,管道污水输送过程中消耗的主要化合物是溶解的碳水化合物和醋酸盐。溶解性碳水化合物的去除主要取决于污水温度和有机质浓度水平。还有研究表明,活性污泥的耗氧量随着 6 ℃温差的变化而降低 5%。而 Vollertse 等<sup>[23]</sup>通过检测不同温度下氧摄入速率来获取短时间内温度对沉积物水解的影响,利用 OUR 指标来表征微生物活性,进而间接分析水解速率,最终发现在 4 ~ 24 ℃内,OUR 随温度升高而升高。

可见,微生物的分解代谢活性受温度影响较大。当温度发生较大变化时,会对排水管道中不同微生物的丰度以及活性产生较大影响,同时温度变化也会影响酶的活性,进而影响反应过程,而且当温度过低或过高时,甚至会导致大部分微生物休眠或失活。

#### ③ pH 值

由于不同管段汇入污水性质不同以及微生物的新陈代谢作用,排水管道中污水的 pH 值也会发生波动。Liu 等<sup>[22]</sup>评估了 pH 值变化对重力下水道沉积物中硫和碳的生化反应特征的影响,结果表明,重力下水道系统在中性 pH 值下沉积物中的硫和碳生化过程最为显著。为了抑制管道中 SRB 和 MA 的活性,常采取在短时间内投加苛性钠使 pH 值升至 10.0 以上的控制策略。Gutierrez 等<sup>[24]</sup>通过改变 pH 值(10.5 ~ 12.5)和暴露时间(0.5 ~ 6.0 h),探讨 pH 值对下水道中硫化物和甲烷生成方面的影响,发现实验室规模的反应器在投加苛性碱后,硫化物产率降低了 70% ~ 90%,而甲烷产率降低了 95% ~ 100%。

由此可见,pH 值对管道中微生物的影响较大,不同的 pH 范围对应的优势微生物菌群也存在巨大差异,较高或较低的 pH 值均会对微生物产生抑制作用。因此,可通过调节 pH 值抑制微生物的活性来减少有毒有害气体产生,降低污水输送过程中有效碳源的消耗。

#### ④ 流速

流速的变化主要是通过影响管道生物膜的形成与更新过程,从而影响微生物的活性。研究表明,污水内的一些物理因子同样会受到污水流速的影响,如流速变化引起流态的改变、管道底部的剪切力的变化等。流速的变化会改变污水管道的水力条件,进而影响微生物的组成及分布,最终影响到沉积物与污水之间的物质交换。流速较低时,管道内可以富集较多的微生物,从而有利于物质交换。随着水流速度的增加,水体对生物膜以及沉积物的冲刷力度加大,这会加速生物膜的更新。同时由于剪切力和摩擦力的作用,生物膜外层不断受水流冲刷而脱落,这虽然会对生物膜厚度的增加产生抑制作用,但是相对较薄的生物膜结构的传质效果会更好。然而,当流速过大时,因水力冲刷作用造成生物膜的大量流失,从而抑制生物膜生长和微生物的活性<sup>[25]</sup>。

因此,流速对于排水管道中生物的影响可以分为正反两方面,一定的流速有助于管道内生物膜的定期更新,进而增加生物量以及生物活性,但随着流速的增大,水流剪切力不断增加,外层老化的生物膜不断受水力冲刷而脱落,抑制了生物膜厚度的增加,却加快了生物膜更新,增加了生物膜的传质效果。当流速增大到一定程度时,才会产生抑制生物活性

的效果,进而影响到污水与沉积物之间的物质交换。

#### 4 沉积物与污水间污染物转移转化的危害

由于沉积物与污水之间的转移转化过程复杂多样,因而其造成的影响和危害也涉及多个方面,其中包含直接影响(管道堵塞、过水通量下降等)和间接影响(管道腐蚀、破裂等)。根据造成影响的对象,可将其分为三类:①对管道自身的影响及危害,包含堵塞、腐蚀等问题;②对人群、环境的影响及危害,包含污水溢流、气体泄漏、地面塌陷等问题;③对污水处理厂的影响及危害,包含碳源减少、进水水质波动等。

##### 4.1 对管道自身的影响及危害

城市排水管道作为城市排水系统的重要组成部分,发挥着不可或缺的作用。排水管网在长期使用过程中,由于最初设计不合理、管理方面不完善、运行维护的不健全等多方面原因,极易发生颗粒物沉积与堵塞的现象<sup>[10]</sup>。汤霞等<sup>[26]</sup>调研了安徽省巢湖地区的排水管道并进行分析,发现所调研排水管道中存在沉积物堵塞的占比为33%,其中存在沉积物严重堵塞现象的排水管道占比可达17%。张伟等<sup>[20]</sup>对广州部分区域排水管网调研发现,存在不同程度的沉积物沉积现象的排水管网占比可达50%以上。为防止排水管道淤积,保证雨季管道正常的排水通量,防止洪涝或溢流,大部分城市的相关部门每年都要对城市排水管网开展2~3次的清淤活动,大型的主干管路由于过水通量大、流速快,不易赋存沉积物,一般2~3年清淤一次,而某些中小支管和干管中易存在淤积严重的现象,有时甚至每个月都需要进行1~2次的清淤,这将会带来大量人力物力消耗。

污水管道沉积物沉积状况也取决于当地人口密度、排水体制、生活习惯、水质水量、降雨强度及时空分布等。排水管道中沉积物的淤积、堵塞会大大降低排水管道过水通量,进而引发污水的溢流,而且淤积在排水管道底部的沉积物中赋存了大量营养物质,为微生物的生长代谢提供了适宜环境,因而极易产生硫化氢、甲烷等有毒有害气体,引发排水管道腐蚀。对于管网腐蚀问题,Hvitved-Jacobsen等<sup>[27]</sup>的研究表明,0.1~0.5 mgS/L的总硫化物浓度易引发轻度混凝土腐蚀,而2.0 mgS/L的硫化物浓度可能会导致严重的混凝土腐蚀。为了控制管网腐蚀问题,往往采取投加药剂等化学手段,澳大利亚水工业使

用五种化学品来控制硫化氢气体的生成,即氧气、硝酸盐、氢氧化镁、氢氧化钠和铁盐,每年为抑制管道硫化氢气体生成投入巨大<sup>[28]</sup>。仅在美国,因腐蚀导致的下水道资产损失就达140亿美元/a<sup>[29]</sup>。

##### 4.2 对人群、环境的影响及危害

由于管道沉积物长期处于厌氧和缺氧环境中,不免会生长许多厌氧或缺氧微生物,主要包括SRB以及MA<sup>[1]</sup>。SRB产生的硫化氢为有毒气体,且散发恶臭。研究显示,伴随下水道腐蚀发生的微生物作用导致的管道中硫化氢浓度可达12 mg/L,而且每年下水道工人都会因为接触有毒的硫化氢气体而受伤,而产甲烷菌产生的甲烷为温室气体,同样对大气环境与人体健康不利。

在我国,随着城市化和工业化的发展,污(废)水种类以及排放量日益增多,进而引发的城市排水管道腐蚀、破损、堵塞等问题愈发严峻,造成的污水溢流、地下水入渗等问题已严重影响城市景观卫生和生态环境。而且,由于排水管道腐蚀破裂而引发沟槽回填材料的流失,进而造成道路塌陷,给城市交通甚至居民的生命财产安全造成巨大影响。

调查显示,全国295座地级以上城市,超过70%存在黑臭水体。在城市排水管道中由于污水排放源多样,成分复杂,其中含有许多有毒有害物质,比如一些重金属、病原体微生物、有毒有害有机物等,这些污染物通过污水溢流等排放到自然水体,将严重威胁城市生态环境。

近年来,国内外学者针对沉积物引起的溢流污染的研究有很多。为研究径流污染物的来源和途径,Li等<sup>[30]</sup>曾对武汉市境内的排水系统进行了水样采集与检测,结果显示,在径流产生和运输过程中总悬浮固体(TSS)、挥发性悬浮固体(VSS)、COD、TN、TP等指标均显著增大,而且合流制管道中悬浮固体的(56±26)%来自城市地面和暴雨排水口,其余部分来自下水道的沉积物,这表明管道沉积物再悬浮造成的环境破坏日益严重。为进一步研究合流制排水系统在降雨期间管道沉积物对溢流污染物的贡献程度,赵磊等<sup>[31]</sup>通过研究昆明市典型合流制排水小区的雨天径流进出水水量、水质后发现,管道沉积物中污染物的释放易造成污水污染负荷的显著变化,雨天管道沉积物的污染贡献率超过30%,而随着降雨强度增大,沉积物污染贡献率甚至会超过50%。李海燕等<sup>[32]</sup>监测并统计了北京市三场降雨期间合



流制排水系统溢流污水水质的情况,在降雨强度较大时,发现溢流污染物 TN、TP、氨氮、COD、SS 最高分别可达 16.36、10.52、12.73、250、155 mg/L;管道沉积物在雨天对出流水质 TN、TP、COD、SS 的污染贡献率最高分别可达 44.6%、47.3%、48.8%、79.7%。Ahyerre 等<sup>[7]</sup>的研究显示,合流制管道溢流产生的污染物总量中来自排水管道内沉积物的污染负荷约占 80%。因此,在排水管道中,随着降雨强度、人为用水习惯等引起的污水流量突变,易导致沉积物中污染物重新释放进入管道污水中,而在合流制管道中沉积污染物有时会被冲刷释放进入自然水体,进而危害水环境。

#### 4.3 对下游污水处理厂的影响

污水流经管道时,污染物的含量和组成均会发生变化,污水管道对污染物的削减作用主要包括污染物的物理沉积和微生物对污染物的消耗转化,由于生活污水中含有大量颗粒态的有机物,沉积作用对污染物去除的贡献率较大<sup>[3]</sup>。近年来的研究表明,污水在长时间、长距离的输送条件下,微生物降解对污染物浓度变化的作用不可忽略。由于国内的污水管道材质以混凝土为主,大量微生物菌群可聚集形成生物膜黏附在粗糙的管壁上,或以絮体形态悬浮在污水中,以底泥形式沉积在管道底部<sup>[1]</sup>。因此,赋存在管道沉积物中的污染物以及大量微生物菌群不可忽略。

在我国,污水处理厂整体进水 COD、BOD<sub>5</sub> 呈现逐年下降的趋势。唐建国等<sup>[33]</sup>的调研显示,居民生活污水从小区总排口排出时 COD 浓度不低于 350 mg/L。而根据住建部信息中心调研所的数据,2017 年全国污水处理厂进水 COD、BOD<sub>5</sub> 浓度年均值分别仅为 283.07、117.81 mg/L,而德国 2011 年各地污水处理厂年均进水 COD、BOD<sub>5</sub> 浓度已分别达到了 535、227 mg/L。原污水中的碳源严重不足导致污水处理厂营养物的去除效率低,为使污水达标排放往往需要投加大量碳源来满足脱氮除磷需求,这既增加了污水处理成本,又造成了资源浪费。

与此同时,由于居民用水习惯以及降雨等因素导致的管道中污水流量的突变,极易引起管道中污染物的再悬浮。研究<sup>[16]</sup>表明,排水系统径流中 60% 的悬浮物和 COD 来自于沉积污染物的再悬浮释放。Verbanck 等<sup>[17]</sup>研究了旱天低流量情况下泥水交界处污染物的变化,发现正常生活污水中存在

的颗粒物的一部分(主要是有机碎片,如人的粪便、食物垃圾,大小约为 mm 级,甚至更大)会沉降到泥水交界处并离开水流的主体,而且受床层水力阻力的影响,泥水交界处会富集大量污染物。然而当床层受到的剪切应力超过 1.1~1.2 N/m<sup>2</sup> 时,观察到沉积物中污染物向污水的释放。总之,沉积物层可赋存大量有机物,而且极易在水流冲刷过程中释放到污水中,因此会对下游污水处理厂的进水水质造成冲击,进而影响污水处理厂的长期稳定运行。

#### 5 结语

我国对管道沉积物的研究相比于国外还较少,而且研究水平也相对落后。我国排水系统大多数属于合流制排水系统,少数为分流制系统,但雨污混接现象严重,管道沉积物累积造成管道输水能力降低以及微生物反应引发污染物转化造成的碳源消耗和环境破坏不容忽视。由于下水道系统中发生的沉积物积聚(堵塞)和生物分解(气味和腐蚀)等已经严重影响了城市排水管道的正常运行,从而引起了研究人员和管理部门的高度重视。

由于我国排水管网存在的错接混接、污水偷排以及紊流等均会引起管道排水环境的复杂变化,进而影响沉积物的物理、生化反应过程。到目前为止,污水和沉积物之间的转化过程及控制条件等还未彻底明确,应尽快深入开展管道沉积物与污水之间物质转移转化的相关研究。结合国内外最新研究成果和经验,利用先进工艺和技术,建立适用于我国城市的管道沉积模型,全面探索污水系统沉积物与污水之间污染物的转移转化过程、条件、机制,这将有利于控制有毒气体排放和管道腐蚀的潜在风险、维护良好的城市水环境、减少甚至切断污水输送过程对碳源的消耗、维持污水处理厂进水的稳定,最终为有效制定管道沉积物的清掏策略以及管理措施提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] LIU Y W, NI B J, GANIGUÉ R, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments [J]. *Water Research*, 2014, 70: 350–359.
- [2] MACKEY H R, MORITO G R, HAO T, *et al.* Pursuit of urine nitrifying granular sludge for decentralised nitrite production and sewer gas control [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 289: 17–27.
- [3] 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.* Study on the pollutant deposition and erosion release in the urban sewer network [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(5):253-257 (in Chinese).
- [4] ASHLEY R, CRABTREE B, FRASER A, *et al.* European research into sewer sediments and associated pollutants and processes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129:267-275.
- [5] JIN P K, WANG B, JIAO D, *et al.* Characterization of microflora and transformation of organic matters in urban sewer system [J]. *Water Research*, 2015, 84(1):112-119.
- [6] JIN P K, SHI X, SUN G X, *et al.* Co-variation between distribution of microbial communities and biological metabolism of organics in urban sewer systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(3):1270-1279.
- [7] AHYERRE M, CHEBBO G, SAAD M. Sources and erosion of organic solids in a combined sewer [J]. *Urban Water*, 2000, 2(4):305-315.
- [8] 杨云安, 管运涛, 许光明, 等. 老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究 [J]. *给水排水*, 2011, 37(9):159-162.
- YANG Yun'an, GUAN Yuntao, XU Guangming, *et al.* Characteristics of sediment in drainage network in different functional districts in old down town [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37(9):159-162 (in Chinese).
- [9] ASHLEY R M, BERTRAND-KRAJEWSKI J, JACOBSEN T H, *et al.* Solids in Sewers: Characteristics, Effects and Control of Sewer Solids and Associated Pollutants [M]. USA: IWA, 2004.
- [10] SHI X, SANG L T, WANG X C, *et al.* Pollutant exchange between sewage and sediment in urban sewer systems [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 351:240-247.
- [11] 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 network [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(3):1009-1014 (in Chinese).
- [12] 李海燕, 李明怡, 崔爽. 流速对雨水管道中沉积物-水界面磷的释放及其释放速率的影响 [J]. *环境化学*, 2013, 32(6):1056-1061.
- LI Haiyan, LI Mingyi, CUI Shuang. The influence of flow rate on the amount and rate of phosphorus release at the sediment-water interface in rainwater pipes [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(6):1056-1061 (in Chinese).
- [13] 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.* Scour and deposition of pollutants in urban sewage pipe network [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5):1965-1971 (in Chinese).
- [14] SHI X, NGO H H, SANG L T, *et al.* Functional evaluation of pollutant transformation in sediment from combined sewer system [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238:85-93.
- [15] YIN H B, HAN M X, TANG W Y. Phosphorus sorption and supply from eutrophic lake sediment amended with thermally-treated calcium-rich attapulgite and a safety evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 285:671-678.
- [16] BERTRAND-KRAJEWSKI J L, BARDIN J P, GIBELLO C. Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer [J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(6/7):109-117.
- [17] VERBANCK M A. Capturing and releasing settleable solids—the significance of dense undercurrents in combined sewer flows [J]. *Water Science & Technology*, 1995, 31(7):85-93.
- [18] MUYZER G, STAMS A J. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(6):441-454.
- [19] LI C J, YU H X, TABASSUM S, *et al.* Effect of calcium silicate hydrates coupled with *Myriophyllum spicatum* on phosphorus release and immobilization in shallow lake sediment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 331:462-470.
- [20] 张伟, 余健, 李葳, 等. 广州市排水管道沉积现状研究分析 [J]. *给水排水*, 2012, 38(7):147-150.
- ZHANG Wei, YU Jian, LI Wei, *et al.* Analysis on current situation of the deposit in drainage pipe in Guangzhou City [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(7):147-150 (in Chinese).
- [21] 张伟. 基于 InfoWorks CS 模型的排水管道沉积规律研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

- ZHANG Wei. Research on Sediment Deposition in Drainage Pipes Using InfoWorks CS Model [D]. Changsha: Hunan University, 2012 (in Chinese).
- [22] LIU Y C, WU C, ZHOU X Y, *et al.* Effect of variation of liquid condition on transformation of sulfur and carbon in the sediment of sanitary sewer [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 65–69.
- [23] VOLLERTSE J, ALMEIDA M D C, HVITVED-JACOBSEN T. Effects of temperature and dissolved oxygen on hydrolysis of sewer solids [J]. Water Research, 1999, 33(14): 3119–3126.
- [24] GUTIERREZ O, SUDARJANTO G, REN G, *et al.* Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems [J]. Water Research, 2014, 48: 569–578.
- [25] 王保亮. 排水管道处理污水模拟试验研究及其统计模型的建立 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2012.  
WANG Baoliang. Studies on Mathematical Statistical Model and Simulation of Sewage Treatment by Drainage Channels [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [26] 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 sediment in urban sewer system [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(3): 55–58 (in Chinese).
- [27] HVITVED-JACOBSEN T, VOLLERTSEN J, MATOS J S. The sewer as a bioreactor – a dry weather approach [J]. Water Science & Technology, 2002, 45(3): 11–24.
- [28] GANIGUE R, GUTIERREZ O, ROOTSEY R, *et al.* Chemical dosing for sulfide control in Australia: an industry survey [J]. Water Research, 2011, 45: 6564–6574.
- [29] EIJO-RÍO E, PETIT-BOIX A, VILLALBA G, *et al.* Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: a review and case studies [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(3): 2084–2094.
- [30] LI L Q, YIN C Q. Transport and sources of runoff pollution from urban area with combined sewer system [J]. Environmental Science, 2009, 30(2): 368–375.
- [31] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1561–1570.  
ZHAO Lei, YANG Fengle, WANG Junsong. Characteristics of storm-water pollutant source in a combined sewer system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(8): 1561–1570 (in Chinese).
- [32] 李海燕, 徐尚玲, 黄延. 合流制排水管网雨季出流污染负荷研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2522–2530.  
LI Haiyan, XU Shangling, HUANG Yan. Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(9): 2522–2530 (in Chinese).
- [33] 唐建国, 王家卓, 马洪涛. 完善城市排水系统, 巩固和提升黑臭水体整治成效 [J]. 给水排水, 2018, 44(1): 1–7.  
TANG Jianguo, WANG Jiazhao, MA Hongtao. Complete the urban drainage system, consolidate and improve the effect of black smelly water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(1): 1–7 (in Chinese).

作者简介: 王健(1995–), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为管道及城市污水处理系统。

E-mail: 2018101884@ruc.edu.cn

收稿日期: 2019–10–24

修回日期: 2020–03–25

(编辑: 丁彩娟)

节约用水强监管, 保护资源补短板