

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.017

# 污水管网不同汇流条件下沉积物运移分布规律

薛甜<sup>1</sup>, 石焜<sup>1,2</sup>, 赵楠<sup>1</sup>, 刘丹<sup>1</sup>, 任博<sup>1</sup>, 金鹏康<sup>1,2</sup>  
(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为探明城市污水管网不同汇流条件下沉积物运移分布规律,通过建立污水管网中试系统,探究了不同汇流区域沉积物厚度的变化特征和碳、氮、磷污染物的冲刷沉积特性。根据研究结果可将污水管网沿程划分为滞流区、分离区、最大流速区、流动复原区四个功能区域。其中,当污水管网干流增加时,管道整体沉积层厚度显著下降,最大流速区冲刷特性最为显著,但滞留区和分离区的污染物浓度均有所增加,且各区域表层碳类沉积物占比明显增加,氮、磷类沉积物占比变化不显著;相对于干流增加,支流增加时滞留区和分离区污染物浓度仍有增加,但其引起的沉积物厚度下降量较低,最大流速区和流动复原区污染物浓度下降较少。

**关键词:** 污水管网; 汇流条件; 沉积物; 运移分布

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0107-07

## Migration and Distribution of Sediment in Sewage Sewer Network under Different Confluence Conditions

XUE Tian<sup>1</sup>, SHI Xuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Nan<sup>1</sup>, LIU Dan<sup>1</sup>, REN Bo<sup>1</sup>, JIN Peng-kang<sup>1,2</sup>  
(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To explore the migration and distribution of sediment in urban sewage sewer network under different confluence conditions, a pilot sewage sewer network system was established to explore the variation of sediment thickness and the scour and deposition of carbon, nitrogen and phosphorus pollutants in different confluence areas. According to the research results, the sewage sewer network could be divided into four functional areas along the route: detention zone, separation zone, maximum flow velocity zone and flow recovery zone. When the main flow of the sewage sewer network increased, the overall sediment thickness of the sewer decreased significantly, and the scour in the maximum flow velocity zone was the most significant. However, the concentration of pollutants in both the detention zone and the separation zone increased, and the proportion of carbon sediment pollutants in the surface layer of each area increased significantly, while the proportion of nitrogen and phosphorus sediment pollutants did not change significantly. Compared with the increase of the main flow, the concentration of pollutants in

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西高校新型智库; 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016TZC-S-19-3); 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

通信作者: 金鹏康 E-mail: pkjin@hotmail.com

the detention zone and separation zone still increased with the increase of branch flow. However, the decrease of sediment thickness caused by the increase was lower, and the decrease of pollutant concentration in the maximum flow velocity zone and flow recovery zone was less.

**Key words:** sewage sewer network; confluence condition; sediment; migration and distribution

排水管道作为城市排水系统的重要组成部分,几乎都存在不同程度的污染物沉积现象,并且污水流量的不均匀性变化导致沉积物被冲刷再悬浮,释放污染物质,产生二次污染<sup>[1-2]</sup>,造成管道污染物负荷增加,引起污水厂进水水质不规律波动,甚至在合流制管道中,污染物的释放还会严重威胁受纳水体的环境<sup>[3]</sup>。污水流速的不均匀交替变化,导致管道沉积物受到不同程度的冲刷。相关研究表明<sup>[4]</sup>,西安市污水管网形成的沉积物主要是由于低流速下污水管道以直角汇流到干管中造成的,且汇流管道中沉积物的含量大于直流管道。然而,近年来关于管网沉积物的研究主要集中于单一流速条件下的直流和合流制管道沉积物沉积冲刷方面<sup>[5]</sup>。相对而言,对汇流管道中沉积物在不同水力条件下运移规律的研究较少,且在实际污水管网中水力条件不断变化,对沉积层的形态结构影响程度不一,所以研究单一流态下的管网沉积物无法全面解释实际管网存在的沉积物淤积堵塞和水污染等现象。

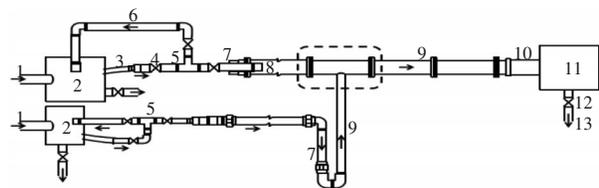
针对现存的实际管网沉积问题,笔者建立了一套城市污水管道汇流模拟系统。通过探究不同流速比下污水管道汇流区域沉积层厚度的变化规律、污水和表层沉积物含量变化与粒径分布,揭示了城市污水汇流管网中不同流速比下污染物分布特性、汇流区域污染物迁移转化特性及相间冲刷悬浮特性,旨在为城市管网汇流运行方式设计优化及汇流管道沉积物清淤奠定理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置及模拟条件

污水汇流管道模拟系统如图1所示。干管、支管的管径分别为200、100 mm,有效长度分别为16、8 m。管段连接处均采用法兰及橡胶圈密封,以确保装置的严格密封性。模拟管道上每段都设置取样口,以便取样分析。装置采用铸铁架支撑,坡度可调节,水流方向随着管段坡度改变。模拟管道及检查井材质均为有机玻璃,并用2 cm厚的保温材料

将其包裹,以模拟实际污水管网避光恒温的环境。管道内壁适当打磨以控制沿程阻力系数及雷诺数,使管道内壁粗糙度与实际钢筋混凝土管的粗糙度相接近<sup>[6]</sup>,从而保证其流动特性与实际污水管道相似<sup>[7]</sup>。



1.城市污水 2.进水箱 3.塑料软管 4.调节阀 5.三通管  
6.回流管 7.PVC管 8.溢流堰 9.有机玻璃管道 10.螺 纹管  
11.出水箱 12.出水阀 13.排水

图1 污水汇流管道模拟系统示意

Fig.1 Schematic diagram of simulation system of sewage confluence pipeline

### 1.2 试验条件及进水水质

污水管道模拟装置在室温下运行,温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,装置密封性良好,溶解氧(DO)浓度为 $(0.3 \pm 0.1) \text{ mg/L}$ 。通过污水管道内放置的潜污泵将进水提升至模拟管道系统的循环水箱,之后在模拟管道系统的干管和支管同时进水,经过汇流后流入循环水箱,通过软管将出水箱中的污水输送至进水箱以实现内循环,完成实际污水管网的模拟。试验分为3组不同的流速比: $v_{\text{支}}/v_{\text{干}}=0.15/0.25$ 、 $v_{\text{支}}/v_{\text{干}}=0.15/0.35$ 、 $v_{\text{支}}/v_{\text{干}}=0.25/0.35$ ,每组运行20 d,水力停留时间为24 h,每日更换城市污水,运行结束后进行下一组试验。

试验污水来自于西安市城市污水管网,总化学需氧量(TCOD)、TN、TP的浓度分别为276~492、39.80~161.72、3.95~9.68 mg/L,pH为6.5~7.5。

### 1.3 样品采集

在城市污水管道模拟系统中,调节不同试验组的条件,经过一个周期的循环,关闭模拟系统,稳定运行15 min后,打开取样口进行取样。图2为不同汇流区域取样点的位置,其中汇流前区域为G1~G3,G1断面有3个取样点,分别为中点及等间

距30 mm的两个点;汇流处所在区域G4、G7断面上有3个取样点,G5、G6两个区域的取样点在管壁内侧;汇流后区域为G8~G11,取样点在G10和G11所在区域断面部分。

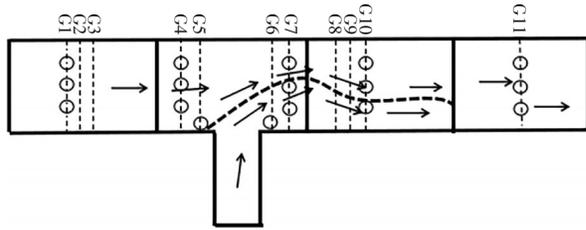


图2 管道汇流各取样点位置及分区示意

Fig.2 Schematic diagram of each sampling point and partition of pipeline confluence

#### 1.4 分析项目及方法

TCOD采用重铬酸钾法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解法测定;TP采用钼锑抗分光光度法测定;粒径采用激光粒度仪测定,测量范围为0.02~2 000  $\mu\text{m}$ 。为了反映断面上污染物的特征,将3个取样点样品混为1个样品进行检测。将1 g沉积物溶于100 mL水中,污水的浓度转化为泥样浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水管道汇流区沉积层厚度的变化

反应器运行前180 d,城市污水模拟管道汇流系统在缓流条件下连续运行,水流冲刷强度相对较弱,污水中的污染物颗粒沉积量大于随水流迁移量,管道汇流前后各区域沉积物的厚度均呈增加趋势,且具有一定的密实度,与桑浪涛等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。180~220 d期间,流速比从 $v_{支}/v_{干}=0.15/0.25$ 调节至 $0.15/0.35$ ,即支流不变干流增加,沉积物厚度的变化如图3所示。可以看出,由于干管水流紊流强度增大,携带能力增强,对管道沉积物冲刷显著,除了G5、G6区域厚度有较小的增加量外,污水管网其他区域沉积物厚度均有不同程度降低,G1、G4、G7各区域的沉积物厚度减小量在7~10 mm之间,G7区域厚度降低尤为显著,G10、G11各区域厚度减小量在5~8 mm之间,厚度变化量较小;220~240 d期间,流速比从 $v_{支}/v_{干}=0.15/0.35$ 调节至 $0.25/0.35$ ,即干流不变支流增加,G5、G6区域厚度有小幅增加,G7区域沉积物厚度减小量为6 mm,G10、G11区域厚度减小量均为4 mm,G7、G10、G11区域沉积物厚度呈较平缓的减小趋势。分析认为,虽然支管水流的紊流强度大,携带能力强,但由于其管

径较小,流速增加不会产生严重影响,因此对管道沉积物的冲刷作用减弱。

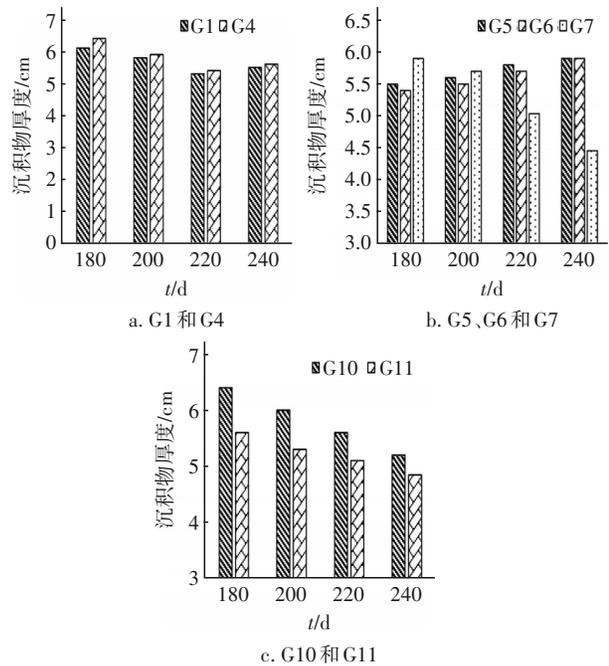


图3 不同汇流条件下汇流前后各区域点位沉积物厚度的变化

Fig.3 Variation of sediment thickness at various points before and after confluence under different confluence conditions

通过上述分析发现,管道内同时存在颗粒污染物沉积与污水冲刷作用,使管道沉积物厚度发生一定的变化。在支流或干流流速增加的情况下,G5、G6区域厚度均是增加的,当支流不变干流增加时,G1、G4、G7、G10、G11区域沉积厚度均有不同程度降低;而干流不变支流增加时,G1、G4区域沉积物厚度增加,G7、G10、G11沉积物厚度减小量低于干流增加时的厚度变化。

### 2.2 汇流条件对沉积层污染物分布的影响

图4为不同汇流条件下汇流前后各区域点位沉积物厚度和污染物浓度的变化。当支流不变干流增加时,G1和G4区域TCOD、TN、TP的平均值分别降低了470.5、17.68、24.32 mg/g。支流流速较小时,产生的影响也小,干管冲刷强度增大,冲刷作用大于沉积作用,因此沉积物表层污染物的浓度明显降低。管网中G5区域TCOD、TN、TP分别增加了181、15.69、7.66 mg/g,G6区域TCOD、TN、TP分别增加了189、19.86、9.86 mg/g,这两个区域是水流停滞区,受冲刷作用的影响小,沉积物厚度和污染物

浓度变化量相对较小。G7 区域 TCOD、TN、TP 分别降低了 584、84.83、32.3 mg/g。G7 区域是流速最大的区域,冲刷较为明显,因此污染物浓度显著下降。G10、G11 区域污染物浓度变化较小。

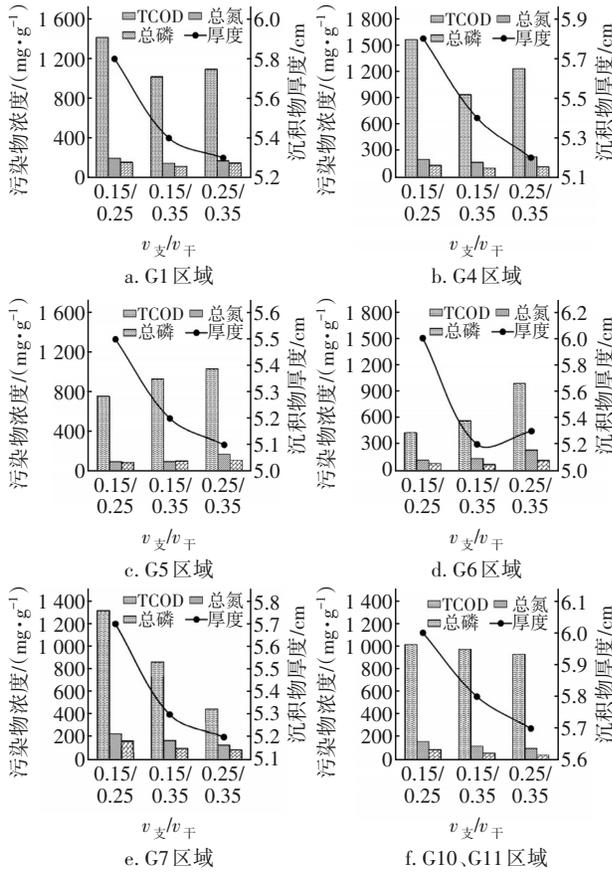


图 4 不同汇流条件下汇流前后各区域点位沉积物厚度和污染物浓度的变化

Fig.4 Variation of sediment thickness and pollutant concentration at various points before and after confluence under different confluence conditions

不同汇流条件下污水中污染物浓度沿程变化如图 5 所示。可知,当流速比由  $v_{支}/v_{干}=0.15/0.25$  增加到 0.15/0.35 时,汇流前区域 G1 上方污水中 TCOD 由 384 mg/L 增加到 424 mg/L, TN 由 134.33 mg/L 增加到 164.28 mg/L, TP 由 6.88 mg/L 增加到 7.72 mg/L; 汇流前区域 G4 上方污水中 TCOD 由 302 mg/L 增加到 358 mg/L, TN 由 122.17 mg/L 增加到 148.36 mg/L, TP 由 5.78 mg/L 增加到 6.92 mg/L; 而对于汇流处两端区域 G5、G6 来说,污染物浓度呈下降趋势,两个区域 TCOD 浓度分别降低 18、22 mg/L, TN 浓度分别降低 7.18、11.97 mg/L, TP 浓度分别降低 0.3、0.24 mg/L。G7、G10、G11 区域是冲刷最为

严重的区域,以 G7 区域表现最为显著,流速达到最大值,冲刷作用占主导,此时污水中污染物浓度最高,该区域 TCOD 浓度由 439 mg/L 增加到 492 mg/L, TN 由 149.28 mg/L 增加到 172.49 mg/L, TP 由 7.54 mg/L 增加到 9.47 mg/L。G10、G11 区域冲刷较为平缓,污染物浓度变化较小,TCOD 平均浓度由 304 mg/L 增加到 326.5 mg/L, TN 平均浓度由 104.37 mg/L 增加到 127 mg/L, TP 平均浓度由 4.21 mg/L 增加到 5.47 mg/L。

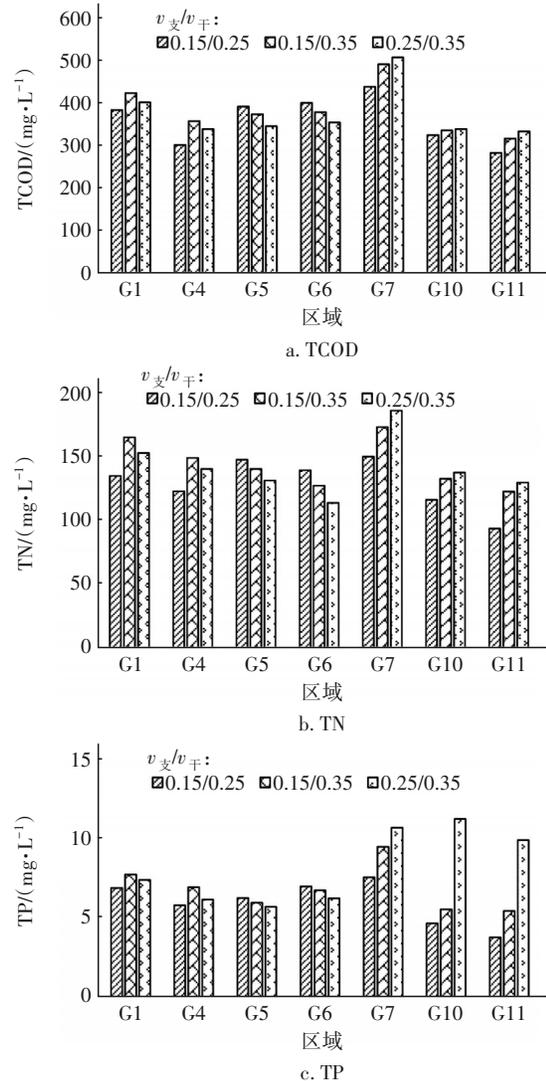


图 5 不同汇流条件下污水中污染物浓度沿程变化  
Fig.5 Variation of pollutant concentration in sewage along the path under different confluence conditions

图 4 中,当干流不变支流增加时,G1、G4 区域污染物浓度有所增加,支流冲刷强度增大对该区域污染物浓度影响较小,沉积作用使该区域污染物浓度有所增加。G5 区域 TCOD、TN、TP 分别增加了 103、

29.76、13.19 mg/g, G6区域TCOD、TN、TP分别增加了334、32.96、19.31 mg/g。G7区域受支管冲刷作用大,沉积物表层污染物含量TCOD、TN、TP分别降低了436、40.26、23.86 mg/g,该区域受支管冲刷作用大,沉积物表层污染物含量减少。G10、G11区域污染物浓度变化量比干流增加时的变化量小。

图5中,当流速比由 $v_{支}/v_{干}=0.15/0.35$ 增加到 $0.25/0.35$ 时,汇流前区域G1上方污水中TCOD浓度由424 mg/L下降到402 mg/L, TN浓度由164.28 mg/L降至152.09 mg/L, TP浓度由7.72 mg/L降至7.39 mg/L; 汇流前区域G4上方污水中TCOD浓度降低了19 mg/L, TN浓度降低了8.62 mg/L, TP浓度降低了0.77 mg/L; 而对于汇流处两端区域G5、G6而言,污水中污染物浓度依然呈下降趋势,两个区域的TCOD分别降低28、24 mg/L, TN分别降低8.94、13.34 mg/L, TP分别降低0.27、0.52 mg/L。G7区域流速达到最大值,此时污水中含有的污染物浓度最高,该区域TCOD增加了16 mg/L, TN增加了12.82 mg/L, TP增加了1.21 mg/L, G10、G11区域污水中含有的污染物浓度少量增加, TCOD平均浓度增加了10 mg/L, TN平均浓度增加了5.9 mg/L, TP平均浓度增加了5.09 mg/L。

综上所述,不同流速比下管道中沉积物的污染物浓度变化与管网中水流冲刷强度密切相关。流速比增加对沉积物表层污染物浓度变化的影响不同,不同区域沉积物表层污染物的变化与2.1节厚度变化相同。

### 2.3 管网污水和污染物相间冲刷悬浮特性

不同汇流条件下,沉积物表层污染物在不同粒径段的分布特征如图6所示。在不同流速比条件下,管道中不同汇流区域的污染物浓度和表层污染物粒径分布差异明显。TCOD主要分布在 $10\sim 50\mu\text{m}$ 粒径段,且在 $v_{支}/v_{干}=0.25/0.35$ 时占比最大,达到69.25%。由此可知,管道中有机物易吸附在粒径较大的颗粒上。李海燕等<sup>[9]</sup>的研究表明,污水中氮、磷主要以颗粒态存在,而试验测得TN、TP的粒径主要分布在 $\leq 10\mu\text{m}$ 的小颗粒污染物上,分别占62.66%和58.38%,因此可以推测管道中氮、磷易吸附在粒径较小的颗粒物上。

当支流不变干流增加时,水力冲刷强度增大,携带污染物的能力增强,导致汇流前区域G1、G4上层污水中污染物浓度增大,并且大颗粒态物质转化

为中小粒径的颗粒,所以沉积物表层大颗粒态污染物( $>100\mu\text{m}$ )占比减少,均值约减少14.65%,中小颗粒污染物( $10\sim 50\mu\text{m}$ )占比增加,由52.13%增加至65.98%,小颗粒粒径污染物( $\leq 10\mu\text{m}$ )的占比增加了14.33%; G5、G6区域污水携带的污染物浓度均降低,沉积物浓度有不同程度增加,且污染物颗粒粒径变化较小,污水中部分大粒径颗粒态污染物会自然沉积,但是干流流速增加,冲刷作用增强,造成这两个区域在 $>100\mu\text{m}$ 的粒径范围内分布占比整体减小,约为15.68%,且污染物主要分布在中小颗粒( $0\sim 50\mu\text{m}$ )粒径范围,约占76.45%; G7区域冲刷强度最大,上层污水中携带的污染物浓度增量较大,冲刷使沉积物浓度降低较为明显,且大颗粒粒径占比减小量较大,约为23.45%,其中部分大颗粒转化为中小颗粒; 汇流后区域G10、G11污水和沉积物中污染物浓度受到影响的程度不同,污水中污染物浓度有少量增加,沉积物表层的污染物浓度有不同程度降低。

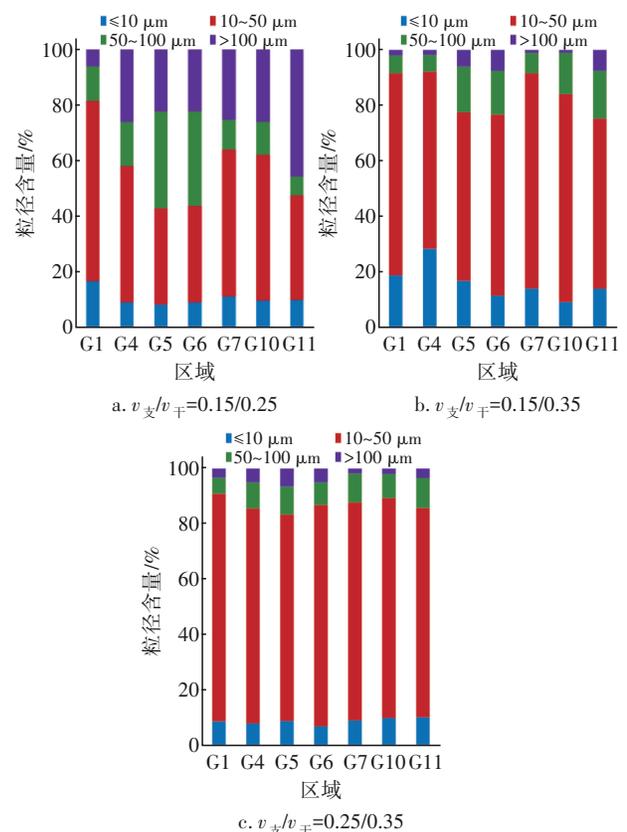


图6 不同汇流条件下表层污染物粒径分布

Fig.6 Particle size distribution of surface pollutants under different confluence conditions

当支流增加干流不变时,水流冲刷能力无明显增强,G1、G4上层污水中污染物浓度均呈降低趋势,沉积物表层污染物浓度有所增加;G5、G6区域污水中携带的污染物浓度同样降低,沉积物浓度增加,这两个区域在 $>100\ \mu\text{m}$ 的粒径范围内分布占比减小值较少,约为2.87%,污染物仍分布在中小颗粒粒径( $0\sim 50\ \mu\text{m}$ )范围内,约占82.79%;G7区域受水流的冲刷强度最大,上层污水中携带的污染物浓度增加,冲刷使沉积物浓度降低。相比于干流增加,支流增加导致G7~G11污水中和表层沉积物浓度的变化幅度较小。

由此可知,对于G5、G6区域,在上述两种情况下污水中携带的污染物浓度均降低,沉积物表层污染物浓度均升高。当支流不变干流增加时,G1、G4和G7区域沉积物表层污染物浓度有不同程度降低,大颗粒粒径污染物占比减小,污染物主要赋存于中小颗粒上;当支流增加干流不变时,G1、G4区域污水中携带的污染物浓度降低,沉积物表层污染物浓度增加,但污染物颗粒粒径分布变化不明显。

#### 2.4 沉积层分区特征变化机理分析

根据上述分析,将城市污水汇流管网划分为不同功能性区域,包括滞留区、分离区、最大流速区、流动复原区,汇流管道剖面如图7所示(红/蓝色虚线表示干/支流增加时沉积物厚度和污染物浓度的变化、红/蓝色菱形块表示该工况下污水中颗粒污染物)。

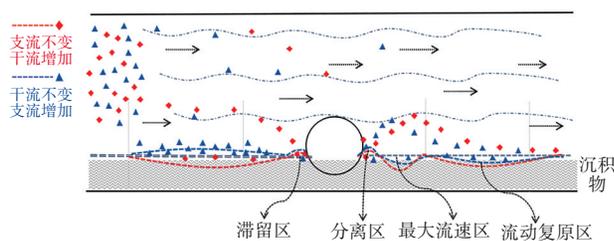


图7 汇流管道剖面示意

Fig.7 Schematic diagram of confluence pipeline section

G1、G4区域,支流不变干流增加时水流冲刷强度显著增大,管网污水冲刷作用大于沉积作用,使得该区域的沉积物厚度减小,沉积物表层污染物浓度减小,干流不变支流增加对该部分区域影响较小,污水中颗粒态污染物在该区域沉积较多,使得表层沉积物浓度有所增加;流速增加均对G5、G6区域的影响较小,其中G5区域局部水流的流速较低,沉积物厚度和沉积物表层污染物浓度变化较

小,所以G5区域属于滞留区;G6区域内存在回流,是水流分离的区域,干流增加对该区域影响较小,支流增加使该区域流线迁移,沉积区域面积增加,沉积物表层污染物浓度有所增加,所以汇流处G5、G6是主要沉积区;G7区域是汇流后最先流经的区域,是冲刷最为明显的区域,该区域污水冲刷强度较大,颗粒态污染物被水流携带,导致沉积物厚度和表层污染物浓度的变化都显著降低,干流增加对该区域产生的影响明显大于支流增加,所以G7属于最大流速区;污水中颗粒态污染物随水流一起运动到更远处,且水流会对沉积层进行冲刷携带,致使更多的颗粒态污染物再悬浮,流速变化对G10、G11区域厚度及污染物浓度影响较小,所以该部分区域为流动复原区。由此可知,不同汇流条件下携带不同粒径污染物浓度的能力不同,且污染物赋存形态也会不同,导致汇流前后不同区域产生不同的沉积现象,从而影响污染物分布,致使汇流管道各部分形成不同的功能性区域。

### 3 结论

① 根据管道沉积物厚度的变化和沉积物碳、氮、磷等污染物的变化及赋存形态可知,不同强度水流携带污染物的能力不同,会引起管道污水和表层沉积物中颗粒态污染物粒径分布和污染物浓度产生显著变化,从而使汇流管道形成四大功能性区域,包括滞留区、分离区、最大流速区、流动复原区。

② 当支流不变干流增加时,分离区和滞留区沉积物表层污染物浓度有所增加,最大流速区的沉积物浓度降低显著,TCOD、TN、TP分别降低584、84.83、32.3 mg/g,上方污水中TCOD、TN、TP浓度则分别增加了53、23.21、1.93 mg/L,而流动复原区污染物浓度降低量较小;当干流不变支流增加时,污染物浓度(分离区、滞留区)仍有少量增加,TCOD、TN、TP平均浓度分别增加了218.5、31.36、16.25 mg/g,最上方(G5、G6区域)污水中TCOD分别降低了28、24 mg/L, TN分别降低了8.94、13.34 mg/L, TP分别降低了0.27、0.52 mg/L,最大流速区、流动复原区污染物浓度下降较少。

③ 当支流不变干流增加时,最大流速区、流动复原区上层污水中颗粒态污染物浓度显著增加,沉积物表层污染物浓度降低,碳类污染物占比明显增加。氮、磷类污染物占比变化较小;当干流不变

支流增加时,最大流速区、流动复原区污水和表层沉积污染物的变化幅度较小,且碳类污染物占比增量较小。两种流速比增加对分离区和滞留区影响均较小,且污染物颗粒粒径分布变化不显著。

#### 参考文献:

- [1] 揣小明,杨柳燕,程书波,等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. 环境科学, 2014, 35(3):951-957.  
CHUAI Xiaoming, YANG Liuyan, CHENG Shubo, *et al.* Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in Lake Taihu and Lake Hulun [J]. Environmental Science, 2014, 35(3):951-957 (in Chinese).
- [2] 卢少勇,远野,金相灿,等. 7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. 环境科学, 2012, 33(5):1497-1502.  
LU Shaoyong, YUAN Ye, JIN Xiangcan, *et al.* Speciation distribution of nitrogen in sediments of 7 rivers around Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2012, 33(5):1497-1502 (in Chinese).
- [3] 高原,王红武,张善发,等. 合流制排水管道沉积物及其模型研究进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2):15-18, 27.  
GAO Yuan, WANG Hongwu, ZHANG Shanfa, *et al.* Current research progress in combined sewer sediments and their models [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2):15-18, 27 (in Chinese).
- [4] 郭海泉. 西安市截流干管水质水量变化规律与解析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.  
GUO Haiquan. Analysis of Water Quality and Quantity in Intercepting Pipe in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [5] 蒋隽睿. 排水管道内沉积物沉积模拟与分析研究[J]. 中国市政工程, 2014(2):35-37, 41.  
JIANG Junrui. Simulation & analysis of sediment deposition in drain pipe [J]. China Municipal Engineering, 2014(2):35-37, 41 (in Chinese).
- [6] 夏星星,冯良. 管道绝对当量粗糙度的取值及其影响分析[J]. 上海煤气, 2010(2):10-12, 17.  
XIA Xingxing, FENG Liang. Analysis of the influence of absolute equivalent roughness [J]. Shanghai Gas, 2010(2):10-12, 17 (in Chinese).
- [7] 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]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3):1009-1014 (in Chinese).
- [8] 桑浪涛,石焯,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).
- [9] 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 of rainwater pipes [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(6):1056-1061 (in Chinese).

作者简介:薛甜(1995-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为水与废水深度处理技术。

E-mail:778388316@qq.com

收稿日期:2019-11-14

修回日期:2020-01-10

(编辑:任莹莹)