

流态变化对污水管网沉积污染物分布及转化的影响

石 烜,田嘉盟,任 博,高 歌,金 鑫,王晓昌,金鹏康* (西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西 西安 710055)

摘要: 为探明城市污水汇流管网流速变化对沉积层污染物及生物菌群演替的影响,通过控制污水管道中试系统中干管、支管流速,模拟了不同汇流条件下城市污水管网系统运行状态,探究了不同汇流条件下沉积层碳、氮、硫类污染物的分布特征以及微生物种群结构的分布规律.结果表明,在不同汇流条件下,COD、TN、NH₃-N、NO₃-N、硫酸盐含量沿沉积层深度方向均逐渐减小,而硫化物含量逐渐升高.当干管、支管流速均增加时,促进了汇流区域不同深度污染物的沉积富集,但由于 DO、ORP 环境因子的改变,以及流速的增大,将沉积层中原有的碳源基质剥离到污水中,减少了微生物可利用的营养物质,同时造成沉积层内部溶解氧含量的上升,沉积层中产甲烷菌(MA)中优势菌属 *Methanosaeta*、硫酸盐还原菌(SRB)中优势菌属 *Desulfomicrobium*、水解发酵菌(FB)中优势菌属 *Caldisericum* 的相对丰度逐渐降低,硫酸化细菌(SOB)中优势菌属 *Thiobacillus* 相对丰度增加,显著影响了沉积污染物的转化特性.污水管网汇流区域流态是改变污水水质及管道微生物系统的重要因素.

关键词: 污水管网; 汇流流态; 沉积层污染物; 冲刷沉积; 生化作用

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)07-3275-08

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0310

Influence of flow regime changes on the distribution and transformation of sediment pollutants in sewer system. SHI Xuan, TIAN Jia-meng, REN Bo, GAO Ge, JIN Xin, WANG Xiao-chang, JIN Peng-kang* (School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China). *China Environmental Science*, 2021,41(7): 3275~3282

Abstract: To prove the convergence of urban sewage pipe network flow velocity change on sediment pollutant and the influence of the biological flora succession, by controlling the sewer pilot system, main and branch pipe flow under different flow conditions to simulate the urban sewage pipe network system running condition, explored the sediment under different flow conditions of carbon, nitrogen and sulfur pollutants distribution characteristics and the distribution of microbial population structure. The results showed that under different confluence conditions, the contents of COD, TN, NH₃⁻-N, NO₃⁻-N and sulfate gradually decreased along the direction of sedimentary depth, while the content of sulfide gradually increased. When the main and branch pipe velocity all increased, promoted the convergence of the deposition of pollutants accumulation areas of different depth, but because of the change in the DO and ORP environment factor and the increase of flow velocity, the sediment in carbon source in the lithosphere matrix into sewage, reduced microbial available nutrients, at the same time caused the rise of dissolved oxygen content in the sediment. The relative abundance of Methanosaeta in methanogen (MA), Desulfomicrobium in SRB and Caldisericum in hydrolytic fermentation (FB) in the sedimentary layer gradually decreased. The relative abundance of Thiobacillus, the dominant bacteria in sulfur oxidizing bacteria (SOB) increased, which significantly affected the transformation characteristics of the deposited pollutants. The flow pattern in the confluence area of the sewage network was an important factor to change the sewage quality and the microbial system of the pipeline.

Key words: sewer system; confluent flow pattern; sedimentary pollutants; scour deposition; biochemical role

城市污水中携带有丰富的颗粒态污染物质,在污水管网输送过程中受重力作用会逐渐沉积于管道底部形成沉积层,带来的管道淤积是制约污水管网实现污水输送的重要因素^[1-3].同时沉积层中的污染物质为微生物繁衍增殖的环境基础,其中厌氧微生物代谢产生了大量的甲烷、硫化氢等有毒有害气体,显著威胁了管网的安全运行^[4-5].

在污水管网系统长时间、远距离的输送过程中,污水流态对沉积层的冲刷沉积以及微生物的生化作用对系统中碳、氮、硫类污染物质含量的变化产生重要的影响.研究表明,污水管道内复杂的水流运

动会对颗粒态污染物输移产生较强的滞留作用,同时影响污水管道的正常运行^[6].随着流速的增加,水流冲刷强度加大,污水中吸附在大颗粒上的有机污染物占比显著增加,而吸附在较小颗粒上的氮、磷类污染物占比减幅较小^[7].研究发现^[8],流经管道的污水水质发生了变化,SCOD 浓度降低,且沉积物中微生物和污水中的微生物对其降解各占 60%和 40%.

收稿日期: 2020-12-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07313-001-01);国家重点研发计划项目(2016YFC0400701);陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

* 责任作者, 教授, pkjin@hotmail.com

同时,受到污水冲刷,沉积层释放污染物进入到水体中,会造成水体污染^[9-11]。

目前,有关污水管网的研究主要集中在污水与沉积物之间污染物质的转化以及沉积冲刷模型^[12-13]等方面,污水管网汇流点位是连接不同管段重要的组成部分,因其不同管道汇流所带来的复杂水力作用,污染物在汇流区域会产生与管段内部不同沉积、转化特性,但相关研究较少。本研究建立一套污水管网汇流管式反应器,模拟不同汇流流态下的城市污水管网运行状态,探索汇流区域沉积污染物分布特征,利用微生物测序手段,研究不同汇流流态下以碳、氮、硫类污染物为基质进行代谢的功能性微生物繁衍特性,旨在为污水管网安全稳定运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

城市污水汇流管道模拟反应器为管径200mm的有机玻璃管,总有效长度16m,支管管径100mm的有机玻璃管,总有效长度8m,为了模拟实际污水管道重力式水流状态,坡度均设置为5%,干管转弯处通过尺寸 $D \times H$ 为400mm \times 600mm的圆柱形检查井连接,连接口均使用法兰、橡胶圈密封,保证系统的密闭性,内部设有挡板为保证水流流态。每段模拟管段上均设有取样点,便于观察模拟管段内的水流状态。由于系统体积较大,为保证其内部温度恒定与抑制光照藻类生长,管道外部均包有20mm厚的保温材料。

整个系统在室温下运行,系统通过潜污泵将实验用水提升至模拟管道系统的循环水箱,进行内循环模拟实际污水管网。实验初期100d,系统在干管、支管均为0.2m/s的低流速状态下运行,稳定沉积层生物相。之后每隔30d天转变1次流态,前30d内,干管0.2m/s、支管0.2m/s(干低支低);运行30~60d,增大支管流量,干管0.20m/s、支管0.5m/s(干低支高);运行60~80d,增大干管流量,干管0.5m/s、支管0.2m/s(干高支低)。

1.2 原水水质

城市污水汇流管道模拟反应器使用西安市第五污水处理厂进水作为原水,原水中所携带的颗粒态物质沉降可促使沉积层的形成。原水水质如下:固体悬浮物浓度 $SS=(580 \pm 100)\text{mg/L}$;挥发性悬浮物浓

度 $VSS=(390 \pm 70)\text{mg/L}$;总化学需氧量 $TCOD=(610 \pm 100)\text{mg/L}$;溶解性化学需氧量 $SCOD=(270 \pm 50)\text{mg/L}$;总氮 $TN=(55 \pm 3)\text{mg/L}$;氨氮 $NH_3-N=(34 \pm 8)\text{mg/L}$;总磷 $= (7.3 \pm 0.6)\text{mg/L}$;pH=7.0 \pm 0.5。

1.3 取样方法

反应器共设4个取样点,分别位于干管距汇流口2m处、支管距汇流口1m处、汇流口、汇流口后2m处,在每一运行周期沉积层生物相繁殖稳定之后,选取固定取样口采集沉积物样品,每一取样点取上、中、下3层沉积物,样品取出后放入无菌培养皿中,送至实验室-80℃超低温冰箱保存,分别进行常规污染物、DO、ORP以及微生物的测试。

1.4 分析方法

1.4.1 DO、ORP 分析方法 对系统污水中的DO与ORP进行测定使用HQ30d便携式测定仪(HACH, USA)。沉积物中的DO与ORP,使用微电极仪器(Unisense Denmark)进行检测,各电极的顶端直径均为10 μm 。使用 N_2 吹脱后的超纯水为基液,将沉积物样品固定于尼龙网上保持静止,将微电极自表层向内穿透沉积物分析其内部环境因子的变化^[14]。

1.4.2 常规污染物分析方法 常规水质指标TCOD、SCOD、TN、 NH_3-N 、 NO_3-N 、硫酸盐、硫化物均采用国家标准方法测定^[15]。

1.4.3 微生物种群分析方法 微生物种群采用16S高通量测序分析,由北京诺禾致源生物信息科技有限公司依照以下步骤展开^[16-18]。

(1)DNA提取与检测:使用试剂盒提取样品中的DNA之后,使用浓度为1%的琼脂糖凝胶电泳检测所提取出来的DNA。

(2)PCR扩增:提前选定所需测序的区域,依据此合成特异性引物,PCR检测所选取ABI GeneAmp@9700型的PCR仪器,每个DNA样品设置两个平行样本,一共3个重复样本按照全部实验步骤进行检测分析,PCR扩增完成之后,将属于各个样本的重复PCR产物进行混合,并使用琼脂糖凝胶电泳进行跑带操作,然后割胶回收不同样本的PCR产物,接下来使用Tris-HCl溶液进行洗脱;最后再使用2%浓度的琼脂糖电泳进行验证分析。

(3) Miseq 文库构建:使用PCR方法将接头序列拼接到目标区域外端,然后接着使用凝胶回收试剂盒割胶回收PCR的产物,对回收的产物进行洗脱,使

用琼脂糖电泳进行检测,最后进行氢氧化钠变性过程,使目标 DNA 形成单链条的片段。

(4) Miseq 测序:首先在 DNA 片段两端加上序列已知的通用接头构建文库,文库加载到测序芯片 Flowcell 上,文库两端的已知序列与 Flowcell 基底上的 Oligo 序列互补,每条文库片段都经过桥式 PCR 扩增形成一个簇,测序时采用边合成边测序反应,即在碱基延伸过程中,每个循环反应只能延伸一个正确互补的碱基,根据 4 种不同的荧光信号确认碱基种类,保证最终的核酸序列质量,经过多个循环后,完整读取核酸序列。

2 结果与讨论

2.1 不同汇流流速下管网沉积层内 DO、ORP 的变化规律

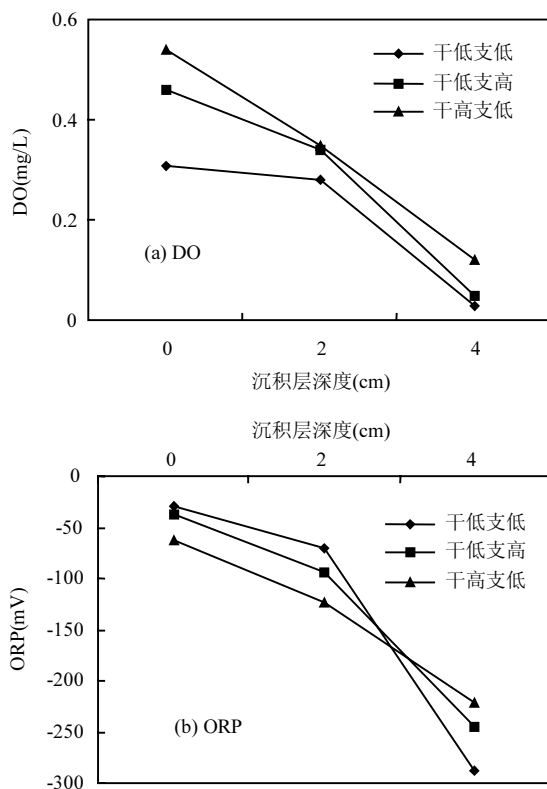


图 1 不同流态下汇流区域后不同沉积层 DO、ORP 的变化趋势

Fig.1 Variation trend of DO and ORP of different sedimentary layers in confluence area under different flow patterns

由图 1(a)可以看出,在沉积物表层,因与污水直接接触,具有较强的好氧性,沿沉积层纵深的变化,逐渐由好氧转变为厌氧状态,以干管高流速、支管低流速下的状态为例,在 0,2,4cm 的纵深处,DO 含量分别

为 0.54,0.35,0.12mg/L.在干管、支管低流速的状态下,表层 DO 含量最低,这是由于低流速状态下,污水对沉积层的冲刷效果最弱,DO 进入沉积层内部的含量最低,增加干管或支管流速后,表层 DO 含量升高,其中干管高流速、支管低流速具有最高的表层含量,高达 0.54mg/L.而在沉积层底部,由于致密沉积层的存在,阻碍了溶解氧的渗透作用,不同汇流流速下,溶解氧没有显著的差异,仅有 0.03~0.12mg/L.

如图 1(b)所示,在上层水体自然复氧状态下从沉积层上层至最下层,不同深度沉积层 ORP 数值不断下降.其中,3 种汇流流态下沉积层表面 ORP 为 -63~-29mV,处于弱还原状态;而在沉积物底层处,沉积层的 ORP 为 -289~-221mV,处于强还原状态,此区域也是厌氧硫酸盐被还原的位置,在此处有大量的硫化氢、硫化物产生.同时,可以看到在干管、支管低流速的状态下,沉积物底层 ORP 最低,为 -289mV,这种状态下沉积物中硫化物积累量最多。

2.2 不同汇流流速下管网沉积层污染物分布特性

如图 2 所示,随着沉积层深度的变化,TCOD 和 SCOD 均表现为持续下降的趋势,以干管、支管低流速的汇流状态为例,在沉积层表面、纵深 2cm 处、纵深 4cm 处 TCOD 的浓度分别为 13900~14800, 10800~12500,9760~11300mg/g;SCOD 的浓度分别为 246~267,199~236,153~174mg/g.这是由于沉积物表层直接与污水相接触,污水中的有机污染物沉降沉积作用较弱,TCOD、SCOD 的浓度相对降低.且沉积层中微生物的生化作用也会对有机污染物起到一定的降解作用,但微生物的生化作用比物理冲刷沉降对污染物的含量影响可以忽略.增加干管或支管流速,污水冲刷作用增强,污染物颗粒沉降作用减弱,对应区域的 TCOD、SCOD 浓度均有所降低。

从图 2 可以看出,TN 浓度沿沉积层垂直方向呈现递减趋势,以干管、支管低流速的汇流状态为例,在汇流点沉积层表面、纵深 2cm 处、纵深 4cm 处 TN 的浓度分别为 201,154,127mg/g.这是由于沉积层表面的孔隙率更大,吸附污水中的氮类污染物的能力更强,随着沉积层深度的增加,沉积层更加致密,孔隙率降低,吸收污染物的能力减弱.同时,增大管道流速,污水对沉积层的冲刷作用加强,更多的颗粒态污染物从沉积层剥离进入污水中,TN 的浓度在沉积

层垂直方向变化较大.NH₃-N、NO₃-N 来源于污水中原本携带的污染物质以及 TN 降解转化的产物,

同样受到污水的冲刷沉积作用而与 TN 具有在沉积层中类似的分布规律.

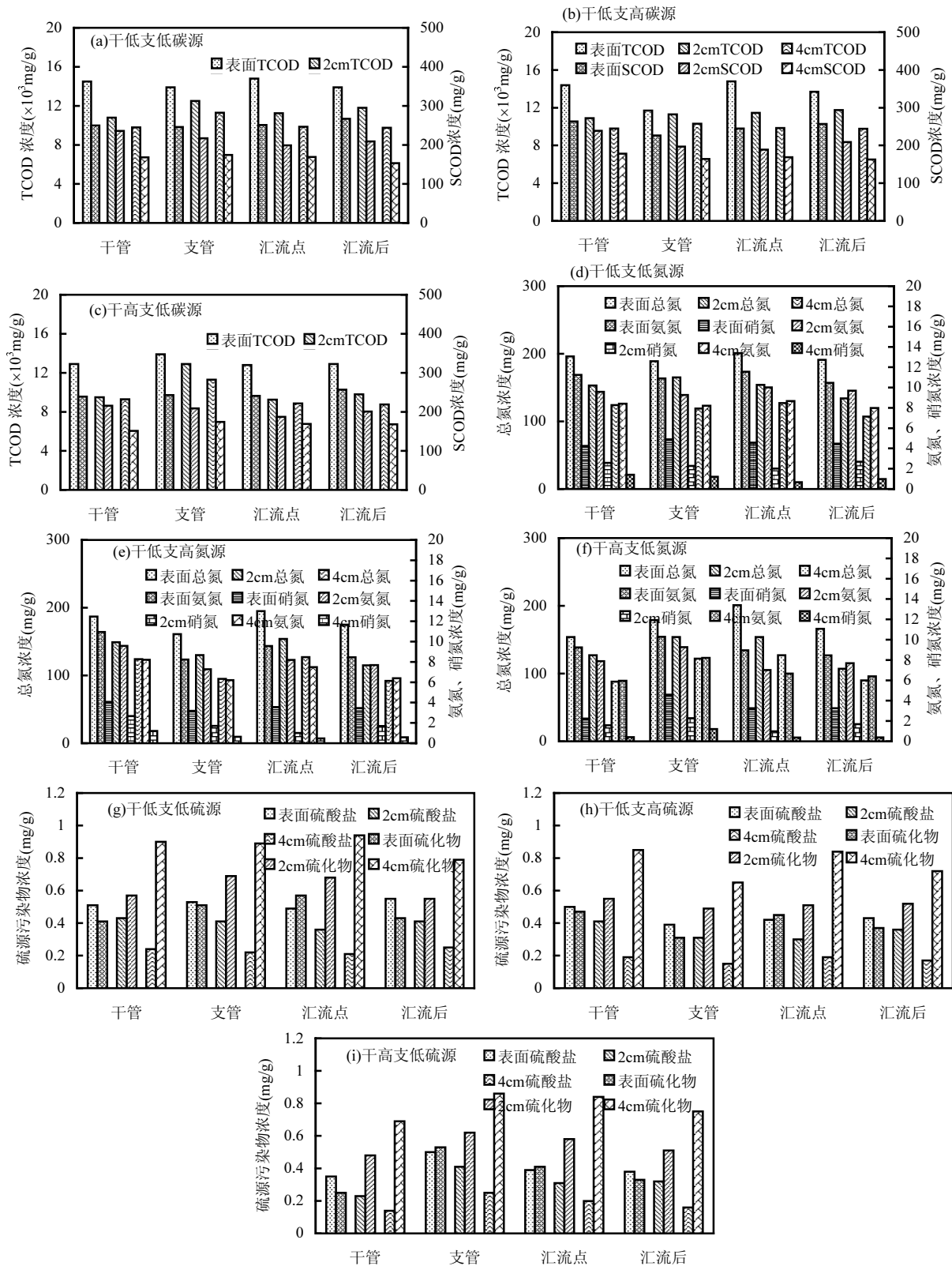


图2 不同汇流流态下碳、氮、硫类污染物沿沉积层纵深的变化规律

Fig.2 Variation rules of carbon, nitrogen and sulfur pollutants along the depth of sedimentary layer under different confluence flow patterns

由于污水的冲刷沉积作用,沿纵深方向沉积层中的硫酸盐含量逐渐降低,以干管、支管低流速的汇流状态为例,在汇流点沉积层表面、纵深 2cm 处、纵深 4cm 处硫酸盐的浓度分别为 0.49,0.36,0.21mg/g,同时,管道流速的增大,也会加强污水的冲刷作用,硫酸盐浓度进一步降低.而由于污水中原有硫化物的含量较低,沉降在沉积层表面的硫化物很少且硫酸盐还原菌严格厌氧,在沉积层深处更有利于硫化物的产生,沿纵深方向沉积层中的硫化物含量逐渐升高,以干管、支管低流速的汇流状态为例,在汇流点沉积层表面、2cm 纵深处、4cm 纵深处硫化物的浓度分别为 0.57,0.68,0.94mg/g.

2.3 不同汇流流态下沉积层中微生物多样性变化特征

利用汇流口后 2m 处沉积层生物相检测到的种群数量(Observed species)反映不同汇流流速下污水汇流管道微生物的种群结构^[19],如图 3 所示,干管、支管低流速的汇流状态下,沉积物具有具有最多的种群数量,这与沉积层 DO 的检测结果相一致,低流速状态下,污水对沉积层的冲刷作用最弱,沉积层受污水流速扰动较小,DO 含量最低,更有利于厌氧微生物的增长,增大干管、支管流速,污水对沉积层的冲刷作用加剧,携带污水中的溶解氧进入沉积层中,不同程度的影响微生物的繁殖.

由图 3 还可见,干管、支管低流速状态下,微生物种群的多样性最大,这是由于低流速状态下不同沉积层氧化还原电位值具有最大的跨度,有利于不同种微生物的繁殖生长.

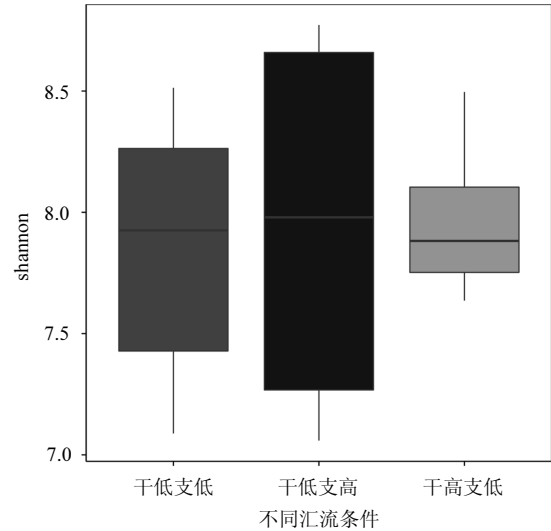
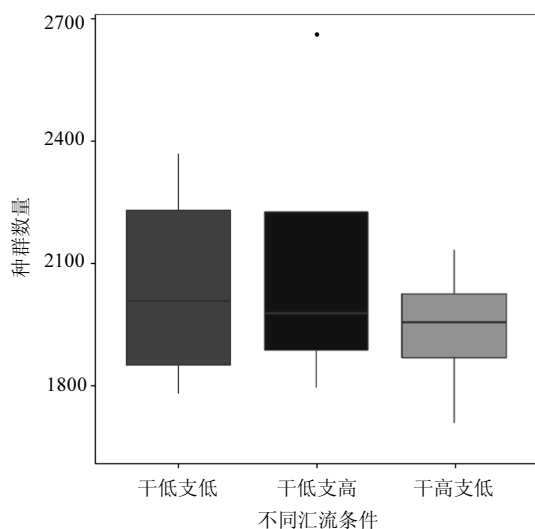


图 3 汇流区域后不同沉积层 Observed species 和 Shannon index

Fig.3 Observed species and Shannon Index of different sedimentary layers after confluents

为进一步探明不同汇流流速下汇流管道沉积层不同纵断面内功能性微生物种群分布的差异性,利用三元相图对 3 种汇流流速状态下的微生物种群结构进行表征分析.如图 4(a)所示,汇流管网中甲烷丝菌属(*Methanosaeta*)具有最高的丰度且在干管、支管低流速的汇流状态下是最优势的微生物种群,相对丰度高达 12.38%,表明 *Methanosaeta* 是污水管道沉积物中最为优势的微生物种群.

如图 4(b)、(c)、(d)所示,在汇流管网沉积层表面变形菌门中的菌属(*Sulfuritortus*)和广古菌门中的菌属(*ferruginibacter*)丰度最高,说明这 2 种菌属在好氧条件下具有更好的繁殖特性.其中 *Sulfuritortus* 在干管、支管低流速状态下的沉积层表面相对丰度最高,高达 10.88%,而 *ferruginibacter* 在干管高流速、支管低流速状态下的沉积层表面聚集最多,相对丰度 4.35%.沿沉积层纵深向下, *Sulfuritortus* 和 *ferruginibacter* 的丰度逐渐降低,而甲烷丝菌属(*Methanosaeta*)、产硫酸杆菌(*Thiobacillus*)和变形菌纲中的菌属(*Sulfurimonas*)丰度逐渐增加.同时,在沉积层的最深处,甲烷丝菌属(*Methanosaeta*)是最优势的微生物种群,在干管低流速、支管高流速的汇流状态下相对丰度最高,高达 17.00%,这表明在沉积层底部,强制厌氧以及低氧化还原电位的条件下, *Methanosaeta* 具有最强的繁殖能力.

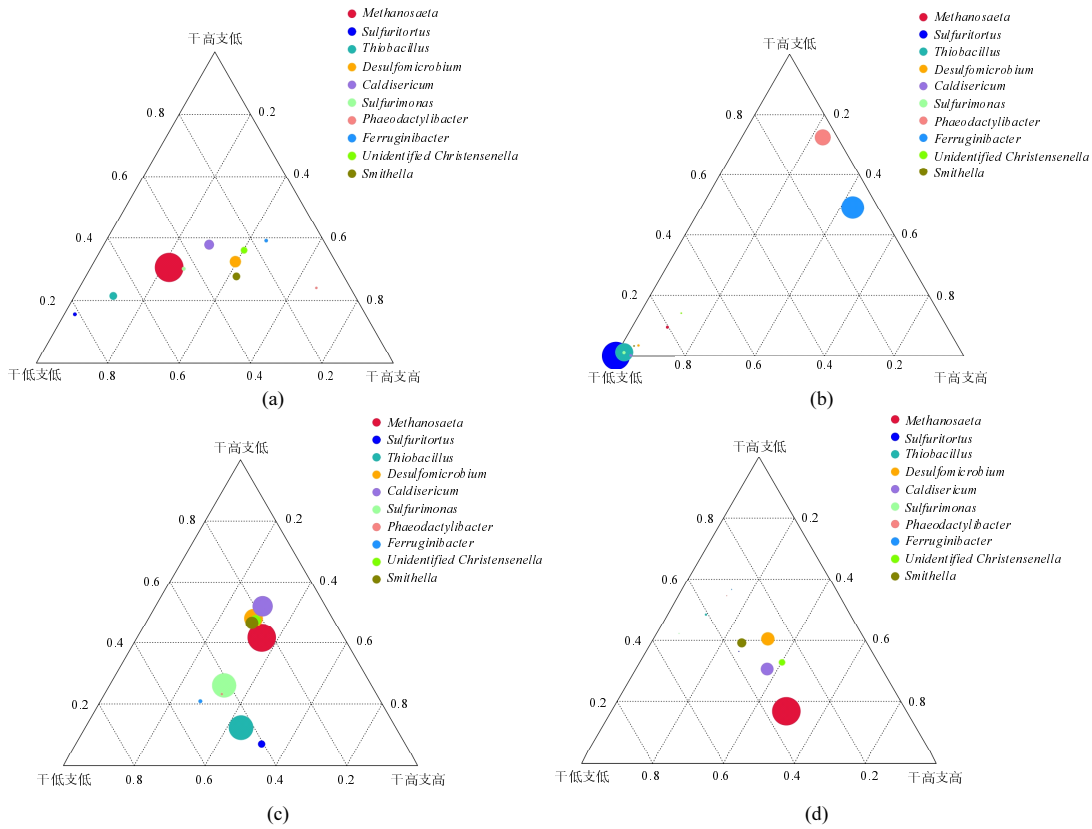


图 4 不同汇流流态下沉积层微生物种群分布

Fig.4 Microbial population distribution in the sedimentary layer under different confluence flow states

a 为沉积层全断面;b、c、d 分别代表沉积层表面、2cm、4cm 纵深处

2.4 不同汇流流态对沉积层内功能性微生物分布 特性的影响

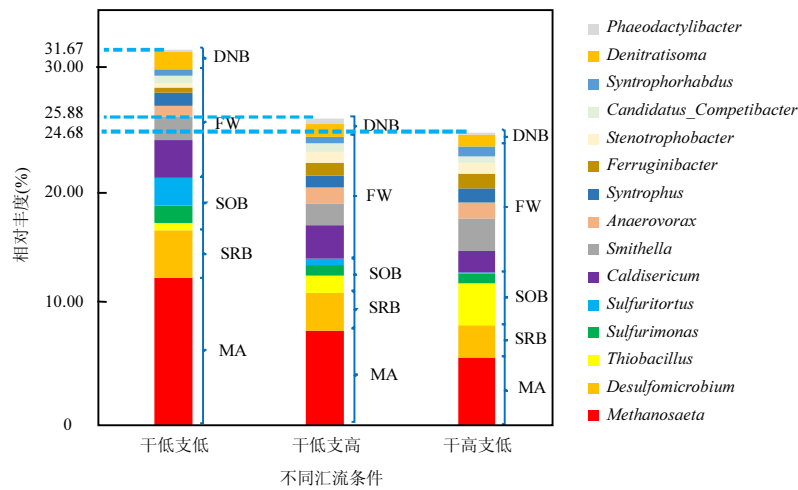


图 5 不同汇流条件下沉积层功能性微生物的相对丰度

Fig.5 Relative abundance of functional microorganisms in sediments under different confluence conditions

如图 5 所示,由于污水管网中存在严重的甲烷逸散现象,因此产甲烷菌(MA)必然是沉积物生物相中的重要组成部分,在 3 种汇流流速状态下 *Methanosaeta*^[20]均是产甲烷菌(MA)中最优势属水

平微生物种群,随着支管、干管流速的增大, *Methanosaeta* 的相对丰度逐渐降低,这是由于流速的增大一方面将沉积层中原有的碳源基质剥离到污水中,减少了微生物可利用的营养物质;另一方面

造成沉积层内部 DO 的上升,抑制了厌氧菌属 *Methanosaeta* 的产生。*Desulfomicrobium* 是硫酸盐还原菌(SRB)中主要的微生物菌属^[21]。其中随着支管、干管流速的增大,相对丰度逐渐降低,这是由于 *Desulfomicrobium* 属厌氧菌,管道流速的增加会造成水流紊动会导致沉积层内部溶解氧上升,抑制了 *Desulfomicrobium* 的产生,同时也造成了硫化细菌 *Thiobacillus* 种群丰度的增加,*Thiobacillus*^[22]属硫氧化细菌(SOB),好氧菌属,能够氧化硫化氢、元素硫、硫代硫酸盐和连四硫酸盐等,而形成硫酸,并从此过程中获得能量。*Caldisericum* 是水解发酵菌(FB)中最优势属水平微生物种群^[23], *Caldisericum* 属于兼性厌氧菌,适宜生长在有机物质含量较高的环境中,具有水解发酵的特性,同时随支管、干管流速的上升,由于污水对沉积层的冲刷沉积,沉积层有机质含量下降且溶解氧含量上升,*Caldarium* 的相对丰度下降。以 *Denitratisoma* 为代表的反硝化细菌(DNB)数量极低^[24],这是由于汇流管道处于厌氧环境,硝化反应很难进行,因此污水以及沉积层中的硝酸根含量极少,DNB 难以进行稳定的代谢繁殖过程。

综上,城市污水汇流管网中污染物转移转化是由多种生化反应共同作用完成的,其中污水汇流管道中的污水对沉积层的冲刷沉积作用,造成沉积层内部溶解氧以及污染物的分布变化,DO 的不同为各类属种微生物提供了生长繁殖的环境,而不同污染物质为沉积层中的不同种类微生物提供代谢的营养物质,微生物的繁殖反过来对污水中的污染物质进行进一步的降解。

3 结论

3.1 城市污水汇流管网沉积层沿纵深方向 DO 含量降低,ORP 值降低且随着管道流速的增加,DO 含量在沉积层纵深方向呈现增大的变化趋势。

3.2 城市污水汇流管网模拟系统研究沿沉积层深度方向,COD、TN、NH₃-N、NO₃-N、硫酸盐含量逐渐减低、硫化物含量逐渐升高,同时增大管道流速,污染物的浓度在沉积层垂直方向变化也相应增大。

3.3 汇流管网中甲烷丝菌属(*Methanosaeta*)具有最高的丰度且在干管、支管低流速的汇流状下是最优势的微生物种群,并且沿沉积层纵深向下,变形菌门中的菌属(*Sulfuritortus*)和广古菌门中的菌属

(*ferruginibacter*)的丰度逐渐降低,而甲烷丝菌属(*Methanosaeta*)、产硫酸杆菌(*Thiobacillus*)和变形菌纲中的菌属(*Sulfurimonas*)丰度逐渐增加。

3.4 属水平微生物种群 MA、SRB、SOB、FW、DNB 在不同汇流流速的城市污水汇流管网中发生了优势种群的转变,随着支管、干管流速的增大,产甲烷菌(MA)中优势菌属 *Methanosaeta*、硫酸盐还原菌(SRB)中优势菌属 *Desulfomicrobium*、水解发酵菌(FB)中优势菌属 *Caldisericum* 的相对丰度逐渐减低,硫氧化细菌(SOB)中优势菌属 *Thiobacillus* 相对丰度增加,以 *Denitratisoma* 为代表的反硝化细菌(DNB)种群数量极低。

参考文献:

- [1] 刘 成.城市排水管道泥沙问题浅析 [J]. 给水排水, 1999,(12):7.
LIU C. Analysis of sedimentation problem in urban drainage pipeline [J]. Water & Wastewater, 1999,(12):7.
- [2] 姚翔译.管网污染物的沉积释放与生化反应基质流向特性研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2019.
Yao X Y. Study on the deposition and release of pollutants in pipeline network and the flow characteristics of biochemical reaction substrates [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [3] Banasiak R. Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2008,57(11): 1743-1748.
- [4] Muynck W D, Belie N D, Verstraete W. Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2009,31(3):163-170.
- [5] 陈 磊,王家鼎,谷天峰,等.大西沟铁矿生态环境模糊综合评价研究 [J]. 土壤通报, 2017,48(4):794-799.
Chen L, Wang J D, Gu T F, et al. Study on fuzzy comprehensive evaluation of ecological environment in Daxigou iron mine [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017,48(4):794-799.
- [6] Manuel R P, Jose A, Joaquín S, et al. Characterisation of sediments during transport of solids in circular sewer pipes [J]. Water Science and Technology, 2017,2017(1):8-15.
- [7] 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 L T, Shi X, Zhang T, et al. Flushing and deposition of pollutants in urban sewerage network [J]. Environmental Science, 2017,38(5): 1965-1971.
- [8] Chen G H, Leung D H W, Huang J C. Removal of dissolved organic carbon in sanitary gravity sewer [J]. J. Environ. Eng., 2001,127:1-7.
- [9] 程龙渊,刘栓明,肖俊法,等.三门峡库区水文泥沙实验研究 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 1999.
Cheng L Y, Liu S M, Xiao J F, et al. Experimental study on hydrologic and sediment in Sanmenxia Reservoir [M]. Zhengzhou: Yellow River

- Water Conservancy Press, 1999.
- [10] Ashley R, Crabtree B, Fraser A, et al. European research into sewer sediments and associated pollutants and processes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003,29(4):267-275.
- [11] Fan C Y. Sewer sediment and control a management practices reference guide [R]. Washington, DC: US EPA, 2004.
- [12] 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.
Jiang J R. Simulation and analysis of sediment deposition in drainage pipeline [J]. *China Municipal Engineering*, 2014,(2):35-37.
- [13] 刘丹,石焯,薛甜,等.城市污水交汇管流模型构建与管道污染物运动特性研究 [J]. *给水排水*, 2020,56(4):144-149,153.
Liu D, Shi X, Xue T, et al. Construction of urban sewage confluence pipe flow model and Research on pollutant movement characteristics in pipe [J]. *Water Supply and Wastewater*, 2020,56(4):144-149,153.
- [14] Li B K, Bishop P L. Micro-profiles of activated sludge floc determined using microelectrodes [J]. *Water Research*, 2004,38(5):1248-1258.
- [15] 国家环保局.水和废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1997.
State environmental protection bureau. Water and wastewater monitoring and analysis method [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
- [16] Caporaso J G, Lauber C L, Walters W A, et al. Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(11SUPPL.):4516-4522.
- [17] Youssef N, Sheik C S, Krumholz L R, et al. Comparison of species richness estimates obtained using nearly complete fragments and simulated pyrosequencing-generated fragments in 16S rRNA gene-based environmental surveys [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2009,75(16):5227.
- [18] De Santis T Z, Hugenholtz P, Keller K, et al. NAST: a multiple sequence alignment server for comparative analysis of 16S rRNA genes [J]. *Nucleic Acids Research*, 2006,34(Web Server issue):394-399.
- [19] Kefford B J, Marchant R, Schaefer R B, et al. The definition of species richness used by species sensitivity distributions approximates observed effects of salinity on stream macroinvertebrates [J]. *Environmental Pollution*, 2011,159(1):302-310.
- [20] Janssen P H. Selective enrichment and purification of cultures of *Methanosaeta* spp. [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2003, 52(2):239-244.
- [21] Dias M, Salvado J C, Monperrus M, et al. Characterization of *Desulfomicrobium salsuginis* sp. nov. and *Desulfomicrobium aestuarii* sp. nov. two new sulfate-reducing bacteria isolated from the Adour estuary (French Atlantic coast) with specific mercury methylation potentials [J]. *Systematic & Applied Microbiology*, 2008,31(1):30-37.
- [22] Huang C, Liu Q, Chen X, et al. Bioaugmentation with *Thiobacillus* sp. HI in an autotrophic denitrification desulfurization microbial reactor: Microbial community changes and relationship [J]. *Environmental Research*, 2020,189:109927.
- [23] Js A, Yh B, Cx A, et al. Enhanced biodegradation of coal gasification wastewater with anaerobic biofilm on polyurethane (PU), powdered activated carbon (PAC), and biochar-Science Direct [J]. *Bioresource Technology*, 289(C):121487-121487.
- [24] Zhang X, N Zhang, Chen Z, et al. Long-term impact of sulfate on an autotrophic nitrogen removal system integrated partial nitrification, anammox and endogenous denitrification (PAED) [J]. *Chemosphere*, 2019,235(NOV.):336-343.
- 作者简介:** 石焯(1990-),男,山西阳泉人,博士后,主要研究方向为污水管网污染物多元转化机制.发表论文 30 余篇.

《中国环境科学》获评“2014 中国最具国际影响力学术期刊”

2014 年 12 月,中国环境科学学会主办的《中国环境科学》被评为“2014 中国最具国际影响力学术期刊”。

“中国最具国际影响力学术期刊”是《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、清华大学图书馆、中国学术国际评价研究中心对我国 5600 余种中外文学术期刊,根据总被引频次、影响因子、被引半衰期等计算出的国际影响力综合评价指标 CI 进行排序,遴选出的排名前 5%的期刊.获评“中国最具国际影响力学术期刊”的科技类期刊共 175 种。

自 2012 年开始此项评选以来,《中国环境科学》已连续 3 年获此殊荣。

《中国环境科学》编辑部