

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.23.003

# 水力条件对污水管网沉积层中SRB与MA的影响

任俊豪<sup>1</sup>, 殷伟民<sup>2</sup>, 贺酰淑<sup>2</sup>, 石 烜<sup>1,3</sup>, 金 鑫<sup>1,3</sup>, 金鹏康<sup>1,3</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. 陕西省水务集团有限公司, 陕西 西安 710000; 3. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000)

**摘 要:** 为探明城市污水管网水力条件对沉积层中硫酸盐还原菌(SRB)和产甲烷菌(MA)的影响,建立了一套长为132 m、管径为DN400的城市污水管道试验系统,探究了污水管道中水体流速对沉积层污染物、环境因子、SRB和MA的影响。结果表明,在污水流速为0.50~1.20 m/s的冲刷条件下,随冲刷时间的增加,沉积层中碳硫基质不断减少,DO和ORP不断升高,沉积层微生物环境显著改变。在水力扰动下,SRB和MA的种群丰度也发生了变化。由于所在沉积物受到污水的扰动(流速为0.50~1.20 m/s),SRB种群丰度随冲刷时间的增加呈下降趋势;而MA种群丰度在污水流速为0.50 m/s条件下整体呈升高趋势,在流速为0.75~1.20 m/s条件下则呈下降趋势。通过监测不同流速扰动沉积物表层、中层后硫化氢(H<sub>2</sub>S)和甲烷(CH<sub>4</sub>)的浓度,发现扰动沉积物中层后能减少两种气体的产生,并且1.00、1.20 m/s这种较大流速在影响沉积物中层微生物环境的同时能够显著影响沉积物的底层,有效抑制了H<sub>2</sub>S和CH<sub>4</sub>气体的产生。

**关键词:** 污水管网; 沉积层; 水力扰动; 硫酸盐还原菌; 产甲烷菌

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)23-0017-06

## Effect of Hydraulic Conditions on Abundance of Sulfate-reducing Bacteria and Methanogen in Sediment Layer of Sewage Pipe Network

REN Jun-hao<sup>1</sup>, YIN Wei-min<sup>2</sup>, HE Xian-shu<sup>2</sup>, SHI Xuan<sup>1,3</sup>, JIN Xin<sup>1,3</sup>, JIN Peng-kang<sup>1,3</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Water Affair Group Co. Ltd., Xi'an 710000, China; 3. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, China)

**Abstract:** To investigate the effect of hydraulic conditions of urban sewage pipe network on sulfate-reducing bacteria (SRB) and methanogen (MA) in sediment layer, a set of urban sewage pipe test system with length of 132 m and diameter of DN400 was established to explore the influence of flow velocity on pollutants, environmental factors and abundance of SRB and MA in the sediment layer. When the flow velocity of sewage was 0.50–1.20 m/s, the carbon and sulfur substrates in the sediment layer decreased, DO and ORP increased, and the microbial environment in the sediment layer changed

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西省教育厅专项科研计划项目(20JK0730); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07313-001-01); 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

significantly with the scouring time. The abundance of SRB and MA also changed when there was hydraulic disturbance. Because the sediment was disturbed by the flow of sewage (the flow velocity was 0.50–1.20 m/s), the abundance of SRB decreased with the extension of scouring time. The overall profile of the abundance of MA was increasing when the flow velocity of sewage was 0.50 m/s, and was decreasing when the flow velocity was 0.75–1.20 m/s. By monitoring the concentration of hydrogen sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) and methane ( $\text{CH}_4$ ) in the surface and middle layers of disturbed sediments at different flow velocities, it was found that the production of the two gases was reduced after the disturbance of the middle layer of sediments. In addition, the high flow velocities of 1.00 m/s and 1.20 m/s significantly affected the microbial environment in the middle layer of sediments and the bottom layer of sediments, and thus the production of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{CH}_4$  was effectively inhibited.

**Key words:** sewage pipe network; sediment layer; hydraulic disturbance; sulfate-reducing bacteria; methanogen

污水管网是城市基础设施的重要组成部分,在长距离输送过程中,污水中悬浮的颗粒态污染物受重力作用逐渐沉降到管道底部,形成沉积物。硫酸盐还原菌(SRB)和产甲烷菌(MA)是管道沉积层微生物,管道封闭厌氧的环境导致SRB和MA大量繁殖,从而持续产生硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )和甲烷( $\text{CH}_4$ ),影响了污水管道的安全稳定运行。沉积层中的碳硫基质等污染物是SRB、MA代谢所需的重要物质,且碳硫比( $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ )是影响SRB与MA活性的重要因素<sup>[1]</sup>。其次,SRB与MA为兼性厌氧菌,MA对ORP的要求( $-300\text{ mV}$ )严于SRB( $-100\text{ mV}$ )<sup>[2]</sup>。适宜SRB和MA生存的pH为7.0~7.5,但在过酸条件下( $\text{pH}<6$ )SRB依然能够生存,而MA却失去活性。此外沉积物的厚度、水流剪切力、铁盐、硝酸盐等对SRB与MA的活性也有一定影响。为了控制污水管网中 $\text{H}_2\text{S}$ 与 $\text{CH}_4$ 的产生,通常采用向管道内投加硝酸盐、亚硝酸盐等氧化剂以削减 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{CH}_4$ 的积累量<sup>[3]</sup>,或者投加游离性亚硝酸、钼酸盐、游离氨(FA)等抑制SRB与MA的活性<sup>[4]</sup>。然而,此类方法需要长时间投加氧化剂或者大量投加灭菌剂,并未从根

本上解决微生物生长代谢问题,而且还可能引发负面环境效应。

污水流速较高的管段内, $\text{H}_2\text{S}$ 的积累量与SRB种群丰度低于其小流速管段内的<sup>[5]</sup>;并且较高流速可能会引起沉积层内的污染物、DO、ORP等与SRB、MA有关的环境因子发生变化,进而影响SRB与MA的生长代谢。同时由于SRB与MA存在共生代谢关系<sup>[6]</sup>和分层分布现象<sup>[7]</sup>,流速冲刷对沉积物中SRB与MA产生的抑制代谢作用会更显著。笔者通过建立城市污水管道试验系统,模拟不同水力条件对沉积层的扰动,考察水力条件对沉积层微生物环境的影响,并通过微生物测序等手段明确流速对沉积层中硫酸盐还原菌和产甲烷菌的影响,旨在为控制污水管网中硫化氢与甲烷的产生提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置及运行条件

城市污水管道试验系统的管道有效长度为132 m,管径为DN400,埋深为0.6 m,整体坡度为0.5%,沉积物铺设位置如图1所示。

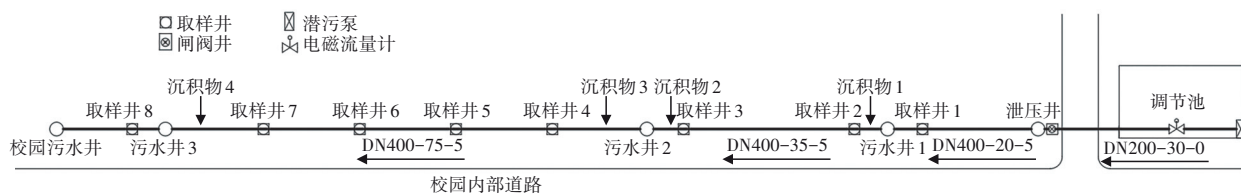


图1 沉积物铺设位置示意

Fig.1 Schematic diagram of placement of sediment

取样井内设有取样口,取样口的盖板与管道外壁间的缝隙涂有填充泡沫,以保证密封性。反应器

从污水厂调节池取水,通过电磁流量计监测流量。污水流经泄压井,以下进上出的方式完成泄压,使管道内污水保持重力流状态。试验前60 d,管道内污水以0.30 m/s低流速运行,以稳定沉积层中的生物相及污染物,随后以不同流速冲刷沉积物。

1.2 原水水质

城市污水管道试验系统使用西安建筑科技大学草堂校区污水处理厂调节池的污水,其中固体悬浮物SS浓度为(235±120) mg/L,TCOD浓度为(820±100) mg/L,SCOD浓度为(270±60) mg/L,TN浓度为(77±13) mg/L,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度为(68±7) mg/L,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度为(4.6±0.8) mg/L,TP浓度为(5.4±1.6) mg/L,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度为(17.8±5) mg/L。

1.3 沉积物铺设及冲刷方法

沉积物取自西安市污水管道,共铺设沉积物4处,每段长为1.2 m、厚为8 cm。沉积物前后设置起保护作用的稳流坡,保证培养期间沉积物结构稳定。据悉,流速≥0.30 m/s时水流会对沉积物产生冲刷携带作用,且流速≥0.60 m/s时水流对沉积层的冲刷携带作用更加显著<sup>[8]</sup>,因此本研究采用0.50、0.75、1.00、1.20 m/s作为冲刷流速。根据沉积物存在的分层分布规律,取沉积物0~2 cm为表层、3~5 cm为中层、6~8 cm为底层。其中,在0.50 m/s流速下,水体冲刷沉积层1 h后可冲掉表层,之后冲刷3 h中沉积层的厚度变化很小(冲刷前约为6 cm,冲刷后约为5.3 cm);当流速为0.75 m/s时,冲刷30 min后可冲掉表层,50 min后可冲掉中层;当流速为

1.00 m/s时,冲刷10 min后可冲掉表层,30 min后冲掉中层;当流速为1.20 m/s时,水力波动十分剧烈,冲刷10 min后仅剩底层。

1.4 沉积物取样方法

每次对沉积层进行冲刷后,培养48 h再对沉积物取样,以稳定沉积物的生物相,且每次取样前通过直尺测量沉积物所剩厚度。沉积层污染物样品分别取自表层、中层、底层,微生物样品取整体沉积物。

1.5 分析项目及方法

常规污染物:常规水质指标COD、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、硫酸盐、硫化物等均采用国家标准方法测定。

DO、ORP:使用微电极仪器检测沉积物的DO与ORP,各电极的顶端直径均为10 μm。以N<sub>2</sub>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以分析其内部环境因子的变化。

管道气体:分别在沉积物冲刷前、第一次冲刷后48 h、第二次冲刷后48 h测量管道内的H<sub>2</sub>S和CH<sub>4</sub>等参数,所用仪器为气体检测仪。

微生物种群:微生物种群采用高通量测序技术进行分析。

2 结果与讨论

2.1 水力条件对沉积层污染物的影响

表1为水力扰动下沉积层SCOD、胞外聚合物(EPS)、硫化物、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的变化。

表1 水力扰动下沉积层SCOD、硫化物、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、EPS的变化

Tab.1 Change of SCOD, sulfide, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and EPS in sediment layer under hydraulic disturbance condition

流速/(m·s <sup>-1</sup> )	冲刷时间/min	SCOD 含量/(mg·g <sup>-1</sup> )			EPS 含量/(μg·g <sup>-1</sup> )			硫化物含量/(μg·g <sup>-1</sup> )			硫酸盐含量/(μg·g <sup>-1</sup> )		
		表层	中层	底层	表层	中层	底层	表层	中层	底层	表层	中层	底层
0.50	0	17.10	13.30	11.20	8.21	11.90	15.90	70.7	77.0	80.3	433	404	433
	60	—	12.10	11.10	—	18.10	22.00	—	72.0	77.1	—	386	412
	240	—	11.20	10.30	—	21.90	31.00	—	63.7	71.7	—	372	402
0.75	0	10.20	8.66	7.07	17.70	19.30	22.30	73.1	78.9	80.7	454	376	337
	30	—	7.07	5.69	—	18.50	21.80	—	71.9	67.5	—	355	325
	50	—	—	4.90	—	—	19.50	—	—	55.4	—	—	311
1.00	0	11.80	10.61	10.40	10.70	11.60	12.70	70.7	72.0	73.0	503	415	376
	10	—	8.51	8.39	—	6.98	7.94	—	61.1	69.0	—	405	374
	30	—	—	8.00	—	—	5.15	—	—	60.3	—	—	351
1.20	0	7.75	6.16	5.70	12.70	13.90	15.70	75.0	79.9	84.6	366	346	356
	10	—	—	5.53	—	—	13.20	—	—	55.5	—	—	386

由表1可知,沉积物表层的SCOD含量最高,且随深度增加而减少,这可能是因为沉积物中SCOD来源于污水中的有机物,表层与污水直接接触,所以SCOD的含量相对较高。沉积物经过不同流速的水体冲刷后,各层SCOD含量均有一定下降,且由表层到底层SCOD的变化量呈现减少的趋势,这是由于表层沉积物的含水率高、结构相对松散,其中的有机物更容易被携带,中层和底层的沉积物更加致密,抵抗水力扰动的能力较强<sup>[8]</sup>。

从表1还可以看出,沉积层中EPS含量随深度的增加而增大,这可能是因为生活在沉积物表面或污水养分附近的微生物比深层微生物生长更快,能够更快速进入静止期,产生更少的EPS。通过不同流速的水体冲刷沉积物发现,污水流速为0.50 m/s时,沉积物各层EPS含量均有所增加;在0.75~1.20 m/s的流速下,EPS含量随冲刷时间增加而减少。由此推断,在较小流速(0.30~0.50 m/s)下,沉积物中的EPS含量随着冲刷时间的增加而增大,以维护微生物环境稳定;在流速增大条件下,当污水剪切应力超过EPS承受的限值时EPS含量会减少。

从水力扰动下硫化物、硫酸盐的变化可知,沉积层中硫化物含量基本随深度而增加。这是因为SRB主要分布于沉积层的中层<sup>[7]</sup>,产生的硫化物向表层和底层传递,而表层硫化物更易被污水携带,深层的硫化物相对稳定;硫酸盐在表层的含量相对较多且基本随深度而减少,这可能是沉积物中的硫酸盐得到污水的补充,并向深层传递的原因。在流速为0.50~1.20 m/s的冲刷下,沉积层中的硫化物、硫酸盐含量均不断减少,主要是因为水流冲刷性大于污染物的沉降性,且硫化物含量的减少还与SRB有关,水力扰动可能抑制了SRB代谢产生硫化物。

## 2.2 不同水力条件下SRB与MA的分布规律

通过16S rDNA基因测序评估水力扰动对沉积层中SRB和MA分布规律的影响,其中SRB属水平的微生物种群有*Desulfomicrobium*、*Desulforhabdus*、*Desulfobulbus*、*Desulfococcus*、*Desulfovibrio*等18种,且*Desulfomicrobium*、*Desulforhabdus*为相对优势种群;MA属水平的微生物种群主要有*Methanosaeta*、*Methanobacterium*、*Methanolinea*、*Methanospirillum*等11种,其中*Methanosaeta*、*Methanobacterium*为相对优势种群。

图2为水力条件对SRB和MA属水平的影响。

可知,在0.50~1.20 m/s流速下,SRB种群丰度随冲刷时间的增加而逐渐降低。特别是在0.75~1.20 m/s的较高流速冲刷下,水流能够在更短时间内扰动沉积物表层和中层的微生物环境,使沉积物中SRB持续减少。因为SRB主要分布于中层<sup>[7]</sup>,当沉积物中层与水流直接接触时,水力扰动对SRB本身以及微生物环境、沉积层中的污染物有直接影响,导致SRB生长代谢受到抑制。

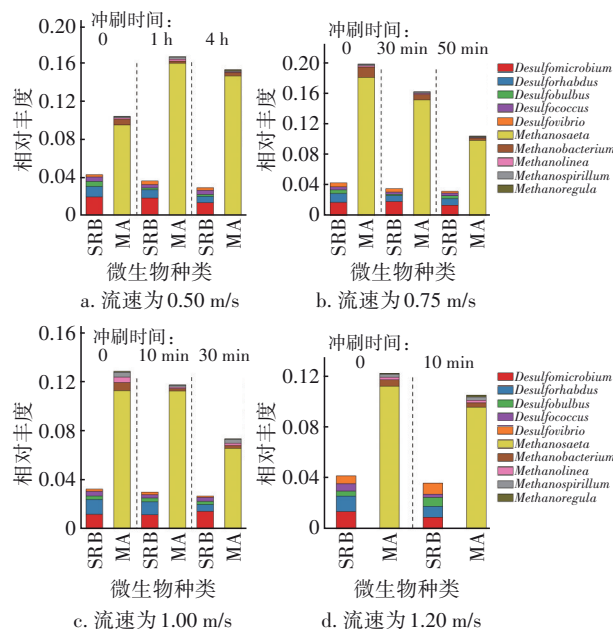


图2 水力条件对SRB与MA属水平的影响

Fig.2 Effect of hydraulic condition on genus level of SRB and MA

由图2还可以看出,在流速为0.75~1.20 m/s下,随着冲刷时间的增加,MA种群丰度不断下降;但在0.50 m/s的流速下,MA种群丰度呈现先升高后略微下降的趋势,总体上MA种群丰度增加。这可能与MA主要分布于底层有关<sup>[7]</sup>,在流速为0.50 m/s的冲刷下,沉积物表层被扰动,处于底层的MA受到的影响相对较小;同时,由于SRB和MA存在底物竞争关系,SRB的减少意味着MA可以通过竞争得到更多的底物,从而致使MA种群丰度升高。随后,对中层3 h的冲刷中,水力扰动纵向影响范围增加,对底层部分微生物环境和污染物等产生了一定影响,MA种群丰度略有下降。

## 2.3 环境因子对SRB与MA的影响

表2为水力扰动对沉积层DO和ORP的影响。可知,在流速为0.50~1.20 m/s的水力扰动下,沉积层中DO浓度随冲刷时间的增加基本呈上升趋势,



并且流速越大DO的变化越大。以1.00 m/s流速下DO的变化为例,在污水冲刷作用下,沉积物表层DO由0.48 mg/L上升到0.62 mg/L,中层由0.33 mg/L上升到0.52 mg/L,底层由0.12 mg/L升到0.48 mg/L。由于SRB与MA是专性厌氧菌,水力扰动导致DO浓度增加,不利于SRB与MA的生长代谢。同时,沉积物在不同流速的冲刷下,沉积层中ORP均随冲刷时间的延长而升高,并且ORP的变化与流速和冲刷时间具有正相关关系。适合SRB生长代谢的ORP最大值为-100 mV,MA为-300 mV<sup>[2]</sup>,在对沉积物进行冲刷过程中,SRB首先受到ORP增加带来的不利影响;MA大多位于沉积层的底部,增加冲刷时间或者采用较大流速才会使其受到更大影响。

表2 水力扰动对沉积层DO和ORP的影响

Tab.2 Effect of hydraulic disturbance on DO and ORP of sediment layer

流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	冲刷时间/min	DO/(mg·L <sup>-1</sup> )			ORP/mV		
		表层	中层	底层	表层	中层	底层
0.50	0	0.49	0.31	0.11	-78	-165	-315
	60	0.45	0.39	0.13	-85	-196	-289
	240	0.52	0.48	0.15	-62	-135	-255
0.75	0	0.52	0.34	0.11	-95	-132	-286
	30	0.62	0.41	0.28	-80	-128	-223
	50	0.65	0.54	0.51	-55	-92	-156
1.00	0	0.48	0.33	0.12	-79	-162	-316
	10	0.53	0.39	0.31	-63	-132	-246
	30	0.62	0.52	0.48	-57	-72	-153
1.20	0	0.68	0.35	0.14	-49	-136	-291
	10	0.61	0.58	0.50	-35	-67	-133

图3为种群数量占前30的属水平微生物(\*代表显著相关,\*\*代表极其显著相关)。*Methanosaeta*是MA中的主要微生物种群,由图3可以看出,其与SCOD、EPS呈现正相关关系,因为MA能够利用有机物降解产物乙酸等来维持自身的生长代谢,而EPS能够在一定程度上增加微生物抵抗水力扰动的能力<sup>[9]</sup>。*Desulfomicrobium*也与SCOD和EPS呈正相关关系;而*Desulforhabdus*却不同,这可能是由于两种SRB之间存在竞争关系,*Desulfomicrobium*作为硫酸盐还原菌的优势种群,当环境因子改变而使其受到不利影响时,处于竞争劣势的SRB种群数量会在一定范围内增加。

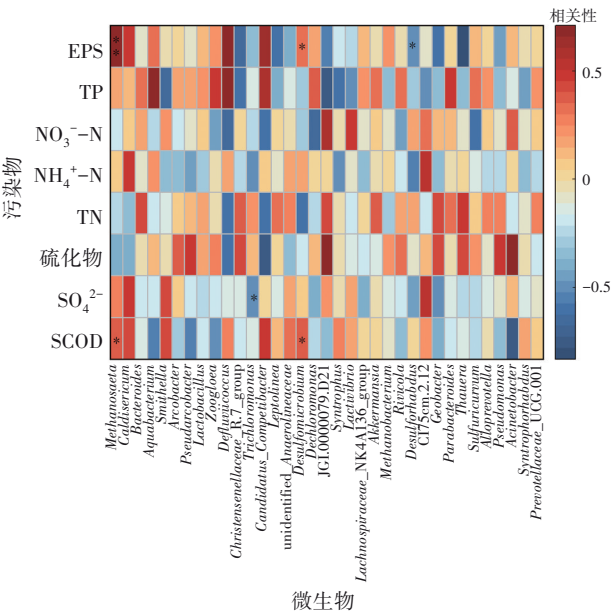


图3 不同水力条件下沉积物微生物种群分布与污染物的Spearman相关性统计分析

Fig.3 Spearman correlation statistical analysis of sediment microbial population distribution and pollution under different hydraulic conditions

2.4 水力条件对SRB与MA代谢的影响

图4为不同水力条件下管道沉积物产生的气体(C0、C1、C2分别表示不同流速下冲刷前沉积物、冲刷1次后沉积物、冲刷2次后沉积物,采用百分比表示冲刷后气体减少量)。

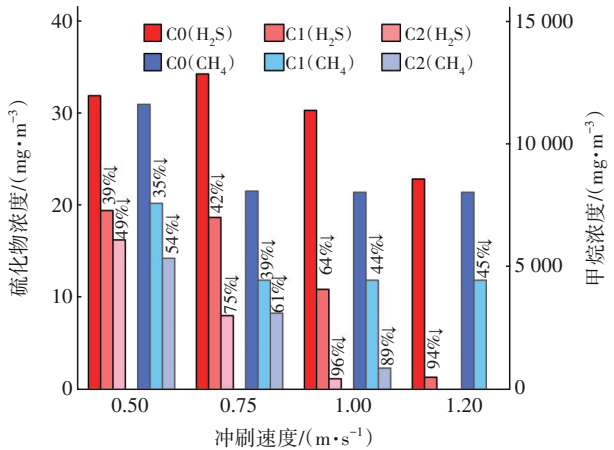


图4 不同水力条件下管道沉积物产生的气体  
Fig.4 Gas generated from pipe sediment under different hydraulic conditions

由图4可知,在污水流速为0.50~1.20 m/s的冲刷下,H<sub>2</sub>S与CH<sub>4</sub>浓度均随着冲刷次数的增加而减少。并且,根据水力扰动下气体的减少量可知,沉

积物中 $\text{H}_2\text{S}$ 气体减少量随着流速的增大而增加。这是因为流速越大对沉积层的扰动越剧烈,从而影响更深层沉积物中ORP、DO、污染物等环境因子。此外,水力扰动沉积物中层微生物环境能够抑制大部分 $\text{H}_2\text{S}$ 气体的产生,当污水以流速为0.75、1.00、1.20 m/s扰动中层后, $\text{H}_2\text{S}$ 气体减少量分别为75%、96%、94%,与冲刷表层相比增加显著。这可能是因为SRB主要分布于中层<sup>[7]</sup>,在水力扰动下,中层内大量SRB被污水携带,并且冲刷对沉积物底层环境产生了剧烈扰动而影响了微生物代谢,从而导致 $\text{H}_2\text{S}$ 气体产生量减少。

$\text{CH}_4$ 气体减少量与流速成正比,随着流速的增加,水力扰动范围不断扩大,对沉积层微生物环境的影响更大,使 $\text{CH}_4$ 气体浓度减少。相对于 $\text{H}_2\text{S}$ 气体减少量,扰动沉积物表层微生物环境后, $\text{CH}_4$ 气体减少量随流速增大而上升得不显著,当扰动沉积物中层微生物环境后却明显增大。这可能是因为MA大多位于沉积层底部<sup>[7]</sup>,当中层受水流冲刷时,底层MA也会受到影响,同时由于SRB与MA之间的共生关系<sup>[6]</sup>, $\text{CH}_4$ 气体的产生量会明显减少。

### 3 结论

① 在流速为0.75~1.20 m/s的水力条件下,沉积层中与SRB和MA呈正相关的SCOD、EPS等污染物随冲刷时间的增加而不断减少;在流速为0.50~1.20 m/s条件下,DO和ORP等环境因子随冲刷时间的增加而不断升高,水力扰动使沉积层的微生物环境不利于SRB和MA的生长代谢。

② 在0.50~1.20 m/s的水力扰动下,沉积层中SRB的种群丰度随冲刷时间的增加而不断下降。在0.50 m/s流速下,MA的种群丰度随冲刷时间的增加整体呈现增加趋势;在0.75~1.20 m/s流速下,MA的种群丰度随冲刷时间的增加而不断下降。较大的冲刷流速( $\geq 0.75$  m/s)对SRB和MA的生长代谢会产生不利影响。

③ 水流扰动中层微生物环境后,能有效抑制硫化氢和甲烷气体的产生。在1.00、1.20 m/s的较大流速下,能够更有效地扰动底层微生物环境,显著减少硫化氢和甲烷气体的产生。

### 参考文献:

[1] SUN J, NI B J, SHARMA K R, *et al.* Modelling the

long-term effect of wastewater compositions on maximum sulfide and methane production rates of sewer biofilm [J]. *Water Research*, 2018, 129:58-65.

[2] GANIGUE R, YUAN Z G. Impact of oxygen injection on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from rising main sewers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 144: 279-285.

[3] LIU Y W, NI B J, GANIGUE R, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments [J]. *Water Research*, 2015, 70(2) 350-359.

[4] LIANG S, ZHANG L, JIANG F. Indirect sulfur reduction via polysulfide contributes to serious odor problem in a sewer receiving nitrate dosage [J]. *Water Research*, 2016, 100:421-428.

[5] AI H N, XU Z W, HUANG W, *et al.* Mechanism and kinetics of biofilm growth process influenced by shear stress in sewers [J]. *Water Science and Technology*, 2016, 73(7): 1572-1582.

[6] SHI X, GAO G, TIAN J M, *et al.* Symbiosis of sulfate-reducing bacteria and methanogenic archaea in sewer systems [J]. *Environment International*, 2020, 143: 105923.

[7] 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: 85-83.

[8] REGUEIRO-PICALLO M, SUAREZ J, SANUDO E, *et al.* New insights to study the accumulation and erosion processes of fine-grained organic sediments in combined sewer systems from a laboratory scale model [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 136923.

[9] 陈珂莉,李朋,金伟,等.排水管道沉积物中胞外聚合物的提取及检测方法研究[J].*中国给水排水*, 2018, 34(7):32-36.

CHEN Keli, LI Peng, JIN Wei, *et al.* Extraction and detection method of extracellular polymeric substances (EPS) in sediment of sewage system [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(7):32-36 (in Chinese).

作者简介:任俊豪(1995-),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为城市污水管网污染物转化。

E-mail:731797917@qq.com

收稿日期:2021-12-16

修回日期:2022-03-12

(编辑:任莹莹)