

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.005

市政污水管网系统中甲烷排放研究现状及展望

王艺臻^{1,2}, 孙婧^{2,3}, 孙即梁^{2,4}, 彭子桐², 吕栩杨², 戴晓虎^{2,3}

(1. 上海电力大学 环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092; 4. 堡森<上海>新材料科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 甲烷是全球第二大温室气体, 积极行动加速甲烷减排对遏制全球气候变暖具有重大意义。鉴于市政污水管网具有可观的甲烷排放量以及巨大的甲烷减排潜力, 综述了市政污水管网系统中甲烷产生与排放研究现状, 主要包括不同类型管道内甲烷的产生机理、污水管网中不同形态甲烷的测量方法、国内外市政污水管网中甲烷浓度现状及影响因素, 并对市政污水管网的甲烷排放途径及总量进行了分析, 在此基础上对市政污水管网的甲烷排放及控制研究提出展望, 以期污水管网甲烷有效减排提供科学依据, 为实际工程应用奠定理论基础。

关键词: 温室气体; 甲烷; 污水管网; 生物膜; 管道沉积物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0029-09

Investigation on Methane Emissions from Municipal Sewer Networks: State of the Art and Perspectives

WANG Yi-zhen^{1,2}, SUN Jing^{2,3}, SUN Ji-liang^{2,4}, PENG Zi-tong², LÜ Xu-yang²,
DAI Xiao-hu^{2,3}

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China; 4. Baosen <Shanghai> Technology Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Methane is the second largest greenhouse gas in the world, and fast and positive actions to reduce methane emission are of great significance to cope with global warming. There is significant methane emissions from municipal sewer networks, and there is a huge potential for the emission reduction. This paper summarizes the research status of methane production and emission from municipal sewer networks, including the methane production mechanisms of different types of sewers, the measurement methods of different forms of methane, the current situation and influencing factors affecting methane concentrations in sewer networks in China and foreign countries. Additionally, it analyzes the pathway and the total amount of methane emission in municipal sewer networks. On this basis, this paper proposes the research prospect for methane emission and control of municipal sewer networks, to provide

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52270092)

通信作者: 孙婧 E-mail: jingsun@tongji.edu.cn; 戴晓虎 E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn

a scientific basis for effective methane emission reduction in sewer networks and to establish a theoretical foundation for practical engineering application.

Key words: greenhouse gas; methane; sewer networks; biofilm; sewer sediment

甲烷(CH_4)是仅次于二氧化碳的第二大温室气体,其全球增温潜势(GWP)是二氧化碳的28倍,且20年内短期增温效应高达二氧化碳的84倍。全球约50%的甲烷排放由人为活动产生,而污水系统是主要的人为甲烷排放源之一。虽然污水系统的甲烷排放量低于煤炭行业和农业,但因其不涉及能源供给及粮食储备,因此具备巨大的甲烷减排潜力。值得注意的是,目前污水系统的甲烷排放量仅统计了污水处理系统中的排放量,没有统计污水管网中的排放量。由于缺乏数据,《2006年IPCC国家温室气体排放清单指南》得出结论:“封闭的地下管网的废水被认为不是甲烷的重要来源”。但2008年以后,澳大利亚、美国、中国等国家先后在污水管道中检测到较高浓度的甲烷,且甲烷经检查井留孔或泵站集水井释放到大气。这些结果引起了研究人员对IPCC有关污水管道中甲烷可忽略不计的结论的质疑,并同时引发了对污水管网中甲烷排放的关注。目前,有关污水管网甲烷排放的研究已在亚洲、欧洲、美洲及大洋洲等区域的多个国家开展。

1 市政污水管网中甲烷的产生机制

研究发现,由于压力管道和重力管道内污水流态的差异,管道内甲烷的产生机制也不同(见图1),因此分别进行讨论。

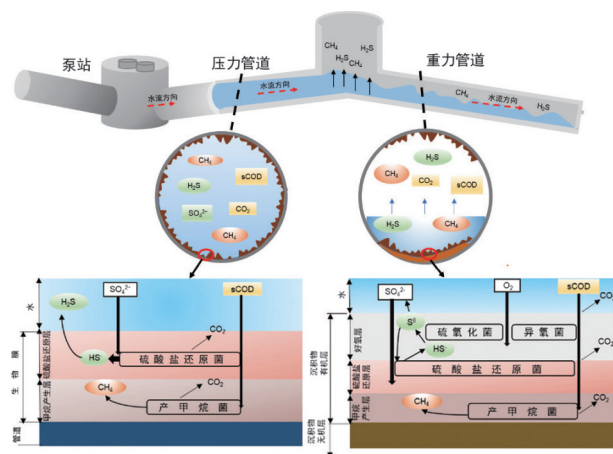


图1 污水管道内产甲烷机制

Fig.1 Mechanisms of methane production from sewer pipes

1.1 压力污水管道生物膜产甲烷机制

压力管道中污水为满管流且流速较快,因此,其中的微生物主要以生物膜的形式附着在管道内壁。同时,由于压力管道内没有顶空,可以形成完全厌氧的环境,为产甲烷古菌生长与繁殖提供良好的条件。简而言之,大分子有机物首先在异养菌的作用下水解发酵为挥发性脂肪酸(VFA),并进一步产氢产乙酸,最后在产甲烷菌作用下,通过乙酸裂解或利用氢气和二氧化碳产甲烷^[1]。

由于污水成分复杂,压力管道生物膜的甲烷生成过程会受到其他物质的影响,其中最重要的就是硫酸盐的影响。硫酸盐是污水中常见的无机盐,在厌氧环境中可以被硫酸盐还原菌利用而还原成为硫化氢。有机物厌氧降解过程中产生的氢气和乙酸则是硫酸盐还原菌可利用的常见电子供体。因此,在污水管道中,硫酸盐还原菌会与产甲烷菌竞争共同的底物从而影响甲烷的生成。一般来说,与产甲烷菌相比,硫酸盐还原菌对氢气和乙酸的亲和能力更好,所以在硫酸盐存在的条件下,管道的氢气和乙酸将主要用于硫酸盐还原及硫酸盐还原菌的生长,而非甲烷的生成。通常来说,生活污水中硫酸盐浓度远低于有机物浓度,并且由于硫酸盐还原菌的存在,硫酸盐在压力管道生物膜内的传质深度会小于溶解性有机物的传质深度,因此 Guisasola 等^[1]推测,在压力管道生物膜的内部,即硫酸盐无法传质到的区域是主要的产甲烷区域。Sun 等^[2]利用荧光原位杂交(FISH)联合共聚焦影像、焦磷酸测序、微电极测量等技术首次证实了硫酸还原菌和产甲烷菌在压力管道生物膜中的分层分布特点:管道生物膜的厚度约为700 μm ,硫酸盐还原菌主要分布在0~300 μm 的外层,产甲烷菌则主要分布在250 μm 以下的内层。

产甲烷菌是压力管道甲烷产生的功能性微生物,由于从压力管道中获取生物膜样品比较困难,因此对实际压力管道中产甲烷菌微生物种群特征的研究较少。Mohanakrishnan 等^[3]早期利用FISH技术,通过安装在压力污水管道上的Robbins装置检

测到了5个科的产甲烷菌,即:*Methanosaetaceae*、*Methanomicrobiales*、*Methanosarcinaceae*、*Methanococcales*和*Methanocaldococcaceae*,并且发现专性乙酸裂解产甲烷菌*Methanosaetaceae*的丰度从管道上游到下游逐渐降低,而噬氢产甲烷菌的丰度随之升高。但是FISH技术只能用于鉴定特定的细菌,因此有必要利用新一代的测序技术对压力管道的细菌群进行系统性研究。Sun等^[2]利用高通量测序法分别检测了澳大利亚及中国的模拟压力管道反应器内的产甲烷菌种群,对比发现澳大利亚管道反应器中产甲烷菌主要为*Methanomethylovorans*、*Methanospirillum*、*Methanosaeta*、*Methanobrevibacter*和*Methanobacterium*等5个属且专性乙酸裂解产甲烷的*Methanosaeta*占比最高,而中国管道反应器中的产甲烷菌主要为*Methanobacterium*、*Methanosaeta*和*Methanomethylovorans*等3个属且专性噬氢产甲烷菌*Methanobacterium*的占比最高。由此可推测,压力管道中的产甲烷菌种群结构不但与其在管道中的位置有关,还受到管道内水质特点的影响。此外,诸多模拟压力管道反应器实验^[4-5]表明,压力管道下游产甲烷菌的活性高于上游。这可能是由于从管道上游到下游硫酸盐浓度不断降低且小分子有机物浓度随水解酸化进行而不断升高。

1.2 重力污水管道沉积物产甲烷机制

重力污水管道一般为非满管流,由于其充满度随管内流量的波动不断发生变化,管壁上附着的生物膜会不定期暴露在空气中,无法保证长期处于厌氧环境,不适合产甲烷菌的生长。但是,重力管道内流速日变化较大,污水中的大颗粒物会沉积在管道底部,形成沉积物。Ahyerre等^[6]将重力管道沉积物分为3层,其中底层为粗颗粒沉积物,表现出无机特性;覆盖于底层粗颗粒沉积物上方的是有机层,表现出较强的生化特性;而有机层表面还会形成以微生物为主的生物膜。Liu等^[7]将重力管道沉积物进行实验室培养后发现,其平均产甲烷速率可达 $1.56 \text{ gCH}_4/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,与压力管道生物膜的产甲烷速率相类似。Ren等^[8]对我国北京市污水管道沉积物采取类似的方法进行培养,测得其甲烷生成速率约为Liu等^[7]报道的5倍。这些研究表明,管道沉积物为重力管道内甲烷产生的主要位点。

由于重力管道中存在空气,其沉积物内微生物的分布比压力管道生物膜更为复杂。理论上,由于

氧气的存在,沉积物的表面可以形成好氧层。该区域内有机物在好氧微生物的作用下被氧化,硫化氢也可以在硫氧化细菌的作用下被氧化成单质硫、亚硫酸盐或硫酸盐等。而对于更深层的区域,由于氧气的消耗则会形成类似压力管道生物膜的厌氧环境。类似地,由于硫酸盐的存在,厌氧区域的上层主要为硫酸盐还原层,下层主要为产甲烷层。Liu等^[7]利用微电极和FISH技术,探索了管道沉积物的硫化氢还原区域和产甲烷区域,结果证实沉积物中产甲烷区域可以到达比硫酸盐还原区更深的内部(0.5~2.0 cm)。此外,该研究还发现在沉积物2.0 cm以下深度却很少有甲烷的产生,推测可能是发酵有机物的传质限制所致。但是,与理论推断不同的是,该研究显示氧气在沉积物的表面上方已被完全消耗,沉积物内部并没有氧气的存在,其原因值得探究。

我国学者对污水管道沉积物中产甲烷菌的群落特征进行了研究。其中,Chen等^[9]采用宏基因测序对上海某污水管道沉积物中的微生物种群进行了分析,研究发现产甲烷菌主要为*Methanosaeta*、*Methanobacterium*和*Methanolina*属,而专性乙酸裂解的*Methanosaeta*占比最高,约占细菌与古菌总数的13%。进一步分析甲烷生成路径中的功能基因,发现乙酸在乙酰辅酶A合成酶的直接作用下生成乙酰辅酶A并进一步生成甲烷是沉积物产甲烷的主要路径。孙光溪等^[10]通过一套1200 m的PVC管式反应器模拟城市污水管网,利用气相色谱法、液相色谱法和罗氏454高通量测序等手段,研究了城市污水管网中产甲烷过程的物质变化和产甲烷菌分布特性规律。结果表明,在管网800~1000 m处有广古菌门中的未知菌属取代甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)成为第一优势菌属的演替现象。

2 城市污水管网系统中甲烷的测量方法

2.1 人工采样-仪器分析法

目前,测量污水管网系统中甲烷浓度的主要方法是先进行人工采样,然后利用仪器对样品进行分析。对于重力管道,一般需采集管道中的水样和管道上部的气体,分别进行溶解态甲烷及气相甲烷的检测。而压力管道内由于是满流,仅可采集水样进行溶解态甲烷的分析。鉴于甲烷的易挥发性,为保证溶解态甲烷测试的准确性,在采样时应避免水样与管道外部空气接触。因此,在压力管道采样时,

一般需要在管道上安装额外的采样支管,直接在支管中抽取水样^[11]。采集的水样通常以半满的方式保存在真空血清管或血清瓶中,然后测定容器中气相甲烷浓度,并结合亨利定律推算样品溶解态的甲烷浓度^[11]。而通过集气袋采集的管道气体则可直接测得其中气相甲烷浓度。

气相甲烷浓度的检测方法主要有催化燃烧法、红外光谱法和气相色谱法等^[1,12-14],其中,气相色谱法具有较好的重现性,线性准确度高,且检测灵敏度好,检出限较低^[14],更加适合检测污水系统中的甲烷浓度。在气相色谱方法中,常见甲烷检测器包括热导检测器(TCD)^[15]和氢焰检测器(FID)。其中,FID检测限可低至 1×10^{-13} g/s,线性范围可达 1×10^7 ^[16],更适合污水管网系统中的甲烷检测。

2.2 在线测量法

在对实际污水管道的检测过程中发现,甲烷浓度随管道流量及污水水质的变化波动很大^[17-18],通过人工采样的方法难以完全捕捉甲烷浓度的变化规律,因此采取连续的在线测量法对全面了解污水管道甲烷浓度变化的规律具有重要意义。

目前,有许多用于气相甲烷监测的在线传感器,如电化学甲烷传感器、半导体电阻式甲烷传感器、光声光谱传感器、热催化式甲烷传感器、红外式甲烷传感器等^[19-20]。红外式甲烷传感器基于红外

特征吸收线的原理,具有显著的灵敏度和选择性,能够克服污水管网中硫化氢气体的干扰,是目前最有效的污水管网中甲烷在线测量方法。Liu等^[21]系统评估了红外式在线传感器用于测量污水管道气相甲烷的适用性,研究发现部分传感器的测量准确度受到管道内高湿度的影响,而将红外式传感器表面温度加热到35℃时可消除该影响。目前,还没有直接的在线检测器用于污水管道中溶解态甲烷的检测。针对这一问题,Liu等^[13]设计了一种装置,将管道中的污水先收集到一个特定的容器中,当甲烷达到气液平衡后,通过气相甲烷传感器测定气相甲烷浓度数据,最后通过亨利定律计算得到溶解态甲烷浓度。试验证明,该装置对溶解态甲烷的测定具有良好的线性关系($R^2 > 0.95$),且可用于实际管道的测量。但是为了提高溶解态甲烷在线监测的便捷度和准确性,有必要研发适用于污水管网条件的溶解态甲烷直接检测装置。

此外,虽然利用在线测量法可获得连续、实时的甲烷浓度数据,但在线传感器的测量容易受到运行条件的干扰。针对这一问题,可在在线测量的同时通过定时人工采样-仪器分析法进行校正,以提高管道甲烷浓度检测的准确性。

污水管网系统中甲烷浓度的检测方法及其优缺点^[19-20,22-27]见表1。

表1 甲烷气体浓度的检测方法及其优缺点

Tab.1 Detection methods of methane gas concentration and their advantages and disadvantages

检测方法	适用场合	优点	缺点
离线	催化燃烧法	甲烷测量浓度范围为 $(0 \sim 6.0) \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$	方法简单、响应时间短,在检测的同时可以进行甲烷废气处理
	红外光谱法	多用于矿井中气体快速分析,最低检测限多在 $3.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^3$	催化元件使用寿命短、元件自身可能成为爆炸源
	气相色谱法	可分辨碳氢化合物,适用于实验室中低浓度甲烷的检测	易受试件表面及背景辐射的干扰,检测时对温度要求高
在线	电化学甲烷传感器	检测范围 $(0 \sim 5.0) \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、分辨率 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$	操作过程简单、分析速度快、数据准确度与精确度高、检测灵敏度好
	半导体电阻式甲烷传感器	检测范围 $(0 \sim 5.0) \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$	设备较复杂,成本较高,不适合在线测量
	热催化式甲烷传感器	只能检测 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以下的甲烷气体,广泛用于我国煤矿中瓦斯的检测	受温度和湿度的影响大,易受腐蚀,平均寿命相对较短,响应时间较长
	红外式甲烷传感器	最低检测限小于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$	当甲烷体积分数大于爆炸下限的1%时,反应较为迟钝,线性和选择性都较差
	光声光谱传感器	甲烷气体最低检测限为 $18 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}^3$	暗火工作,易爆炸
			受外界湿度影响较大
			价格偏高、易受强电磁环境干扰

3 实际管网中溶解态和气相甲烷的浓度

3.1 溶解态甲烷

目前,有关污水管网中溶解态甲烷浓度的研究已在多个国家开展。表2归纳了不同国家实际管网中测得的溶解态甲烷浓度^[28-29],其范围跨度较大,最低为0.1 mg/L,最高为33.0 mg/L,接近甲烷的饱和溶解度(35.0 mg/L、17℃、标准气压)。

表2 污水管网系统中实测的溶解态甲烷浓度
Tab.2 Measured dissolved methane concentration in sewer networks

地点	检测位点	管长/ m	停留时间/ h	平均温 度/℃	甲烷浓度/ (mg·L ⁻¹)	说明
澳大利亚	压力管道	828	3.1~4.6	27.7	4.4~6.1	
澳大利亚	压力管道	1 100	3.9~11.0	22.5	11~33	
澳大利亚	压力管道	4 400	9~10		5~15	夏季
					3.5~12.0	冬季
泰国	重力管道	1 000	22.0~31.4	33.3	8.0~13.7	旱天
			0~12	30.2	0.1~11.4	雨天
澳大利亚	压力管道			23.5	1.00~1.92	

研究发现,污水管网中溶解态甲烷的浓度受到管道运行条件的影响。首先,一般压力管道是满管流,其溶解态甲烷不会挥发至气相,因此其浓度高于重力管道。其次,污水在管道内的水力停留时间(HRT)也是影响溶解态甲烷的重要因素。对比澳大利亚两条压力管道实测数据发现,当污水在管道中的HRT为3.9~11.0 h时,溶解态甲烷为11~33 mg/L,是HRT为2~4 h管道污水中甲烷浓度的2~6倍。此外,管道内的污水水质也会影响甲烷浓度。Sun等^[4]研究发现,当污水COD浓度升高时,其溶解态甲烷浓度也随之上升。但是,高浓度COD废水并不必然导致高浓度的甲烷。污水管道是一个复杂的生化反应器,其中多种细菌(如硫酸盐还原菌、异养菌)都会与产甲烷菌竞争共同的底物从而影响甲烷的产生。例如,我国香港的大部分地区由于利用海水冲厕,其生活污水中含有较高浓度的硫酸盐(500~1 000 mg/L),为硫酸盐还原菌的生长提供了有利条件,但同时也抑制了产甲烷菌的生长,减少了甲烷的产生。

另外,管道污水中的溶解态甲烷也受到温度、降雨等气候条件的影响。Liu等^[28]对澳大利亚某压力管道末端溶解性甲烷浓度进行了监测,发现其夏季浓度为5~15 mg/L,而冬季浓度为3.5~12.0 mg/L。

该研究表明,较高的环境温度将导致较高的管道甲烷浓度。Chaosakul等^[29]在泰国曼谷某重力污水管道检测中发现,旱天污水中的甲烷为8.0~13.7 mg/L,而雨天为0.1~11.4 mg/L。雨天较低的甲烷浓度可能是由于降雨降低了污水在管道中的HRT(从22~31 h降低至0~12 h)并且稀释了污水的COD浓度。

3.2 气相甲烷

甲烷易挥发,在重力管道或污水提升泵站,溶解态甲烷会部分释放到气相中。表3统计了世界各地实测的污水管网系统中气相甲烷的浓度^[21,29-34],其范围在(4~50)×10⁻³ m³/m³之间。同时,在污水管道检查井通气孔附近的空气中也检测到一定的甲烷浓度^[35],说明污水管网系统气相中的甲烷将随空气流动释放到大气中,直接导致温室气体的排放。此外,由表3可知,在澳大利亚和我国的西安、重庆等地测到的污水管道气相甲烷浓度达到甚至超过了甲烷的爆炸下限(LEL=5%)。事实上,重庆、北京等多座城市都发生过由污水管道内甲烷引起的爆炸事件^[36]。因此,污水管网中气相甲烷的积累也会给管网运行造成安全隐患。

表3 污水管网系统空气中的气相甲烷浓度
Tab.3 Gaseous methane concentrations in the air of sewer networks 10⁻³ m³·m⁻³

地点	检测位点	气相甲烷 浓度(体 积比)	备注
澳大利亚	泵站	8~10	
泰国	检查井	1.5~20.0	旱天
		5~10	雨天
澳大利亚	检查井	1.5~50.0	
澳大利亚	检查井	20	
澳大利亚	泵站	2.0~2.5	
中国重庆	检查井	40~50	部分体积比超过5×10 ⁻² m ³ /m ³
中国北京	检查井	4~20	部分体积比超过5×10 ⁻² m ³ /m ³
中国西安	检查井	1~50	部分体积比超过5×10 ⁻² m ³ /m ³
中国兰州	检查井	12~15	夏季
		0~2	冬季
西班牙	检查井	0~1	
	泵站	2~21	

污水管网中气相甲烷的浓度不仅受到管道内甲烷气液传质的影响,同时也与管道的通风有关。对于给定的重力管道,甲烷的气液传质和由通风引起的气相动态平衡可分别用式(1)和式(2)表示。进一步地,当气相甲烷达到平衡时,其甲烷浓度可

通过式(3)进行计算。

$$R_{\text{MTF}} = K_{\text{La}} ([\text{CH}_4]_{\text{l}} - k_{\text{H}} RT [\text{CH}_4]_{\text{g}}) \quad (1)$$

$$Q_{\text{g}} [\text{CH}_4]_{\text{g}} = V_{\text{l}} R_{\text{MTF}} \quad (2)$$

$$[\text{CH}_4]_{\text{g}} = \frac{1}{k_{\text{H}} RT + \frac{Q_{\text{g}}}{V_{\text{l}} K_{\text{La}}}} [\text{CH}_4]_{\text{l}} \quad (3)$$

式中: R_{MTF} 为甲烷气体传质速率, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; K_{La} 为气液传质系数, s^{-1} ; k_{H} 为亨利常数, $\text{mol} \cdot \text{m}^3/\text{Pa}$; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$; T 为温度, K ; $[\text{CH}_4]_{\text{g}}$ 为气相甲烷浓度, mol/m^3 ; $[\text{CH}_4]_{\text{l}}$ 为液相甲烷浓度, mol/m^3 ; V_{l} 为液体体积, m^3 ; Q_{g} 为气体流量, m^3/s 。

由式(3)可知, 气相甲烷浓度与气液传质系数 K_{La} 正相关。研究表明, K_{La} 随管道坡度、管内流速、平均水力半径的增加而增大, 并且管道跌水等引起湍流的情况也会提高 K_{La} , 相应地, 气相甲烷的浓度随 K_{La} 的增大不断提高^[37]。同时, K_{La} 也会随着水温的升高而上升, 因此夏季气相甲烷的浓度往往高于冬季。另外, 依据式(3)可知, 气相甲烷浓度与管道内空气流速(即管道通风条件)负相关。张远等^[30]在对污水管网的实地检测中发现, 当井盖上的通气孔数量越少时, 其中的气相甲烷浓度越高。因此对管道进行有效的通风是降低管网内气相甲烷浓度的重要措施。然而, 提高管道通风也会增加管道中甲烷向大气逸散的风险, 因此控制管道中甲烷的排放还需从源头上减少甲烷的产生。

4 市政污水管网中甲烷的控制措施

市政污水管网中产生的甲烷主要通过两种方式排放: ①溶解态的甲烷会随污水排放至污水处理厂, 并可能在湍流和曝气处理步骤中排放。Wang等^[38]在检测污水处理厂构筑物的甲烷排放时发现, 泵站和沉砂池的甲烷排放量分别为 $4.34 \sim 6.82$ 、 $6.19 \sim 18.87 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 显著高于其他构筑物, 原因是密闭的污水管道产生了大量的溶解性甲烷, 这些甲烷在旋转沉砂池水流的搅动下得到释放^[39]。2019年IPCC发布修订的国家温室气体清单报告将好氧处理系统甲烷排放修正因子的缺省值从0提高到0.03, 其中就考虑了污水管网产生的甲烷在好氧污水处理系统的排放。②污水管网气相中的甲烷可以直接从检查井通气孔、污水泵站等设施排放到大气中。在对美国污水提升泵站甲烷排放的研究中发现, 有机械通风的封闭式泵站甲烷排放量可达

$4\,264 \text{ kgCH}_4/\text{a}$ ^[17]。Eijo-Río等^[34]在西班牙 Calafell 和 Betanzos 两座城市的污水管网中各选择5个采样地点(分别包括泵站和检查井), 对甲烷气体进行了浓度采样与采样点气体流量的检测, 并估计单个采样点排放量分别为 18.6 和 $24.6 \text{ kgCH}_4/\text{a}$ 。但目前有关污水管网气相甲烷直接排放的数据仍十分有限, 以致无法准确确定由该途径导致的甲烷排放量。

尽管目前污水管网甲烷排放的实测数据较少, 但研究人员通过COD衡算、数学模型等方法估测了市政污水管网中甲烷的排放总量。其中, Guisasola等^[40]基于压力管道中实测的溶解态甲烷浓度估算得出, 对于服务人口为10万人(流量中位数 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)的污水管网系统, 其甲烷排放量可达 $900 \sim 5\,300 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$, 约占污水厂温室气体排放量的 $12\% \sim 100\%$ 。此外, Willis^[41]基于SewerX模型对约112万人的污水管网系统的温室气体排放量进行了估算, 其中污水管网内甲烷的排放量为 $1.2 \times 10^4 \text{ tCO}_2/\text{a}$, 占整个区域废水处理范围的 34.4% 。由此可见, 市政污水管网甲烷排放总量十分可观且不应被忽视。因此, 探明污水管网系统甲烷排放量对全面评估污水系统甲烷排放总量并制定有效减排措施具有重要意义。

在污水管道甲烷排放控制方面, 目前世界各国还没有建立直接针对甲烷排放的控制措施, 更多的是在研究控制管道硫化氢方法的同时发现这些方法也可减少甲烷的排放量。例如: ①投加氧化剂(如氧气/空气或硝酸盐)^[42-43], 抑制甲烷的产生与排放; ②投加铁盐, 主要包括氯化亚铁和氯化铁, 用于氧化及沉淀管道中的硫化物^[44]; ③投加杀菌剂(如游离亚硝酸和高铁酸盐)^[44], 降低微生物存活率; ④加碱提高pH, 降低硫化氢产生速率进而降低甲烷产生速率^[45]。但是目前尚未对这些控制方法进行全生命周期的碳排放评估, 识别及研发低碳化的污水管道甲烷排放控制措施对污水系统温室气体排放控制尤为重要。

5 结论与展望

① 由于压力管道和重力管道内污水流态的差异, 管道内甲烷的产生机制也不同。在压力管道中, 管壁生物膜是甲烷产生的主要位点, 由于受到污水中硫酸盐的影响, 其生物膜呈现硫酸盐还原菌在外层、产甲烷菌在内层的层状分布结构。在重力

管道中,沉积物是甲烷产生的主要位点,由于氧气的存在,管道沉积物内微生物的分布更为复杂。因此,对管道内微生物种群结构、微生物代谢特点、共存竞争特性及影响因素的进一步研究,将有助于对管道内微生物产甲烷机理的清晰认识,为控制污水管道甲烷排放奠定重要的理论基础。

② 在市政污水管网甲烷浓度检测方面,气相色谱法和红外式甲烷传感器是目前最适于污水管网条件的离线式和在线式甲烷检测方法,但是目前尚无合适的直接检测溶解态甲烷的在线检测仪,相关仪器的研发将有助于对市政污水管网中甲烷浓度的全面认识。

③ 不同的污水管道甲烷浓度差异较大,一方面甲烷浓度受到水力停留时间、污水水质等管道运行条件的影响,另一方面也受到降雨、温度等气候条件的影响。同时,管道内的气相甲烷浓度与管道内气液传质效率正相关,与管道通风强度负相关。虽然加强管道通风可以降低甲烷在污水管道中的积累,减少管道内甲烷爆炸的隐患,但会导致更多的甲烷释放到空气中并引起温室效应。因此控制管道中甲烷的浓度还应从源头上减少甲烷的产生。

④ 在全球变暖日益严重的背景下,明确污水管网系统中甲烷的排放特点对其有效控制具有重要意义。由于污水管网长度大,覆盖面广,因此有必要在获取更全面的实地数据的基础上,制定可靠的核算准则和数学模型,全面预测污水管网中甲烷排放的变化规律,并研发低碳化的甲烷排放控制措施。

参考文献:

- [1] GUIASOLA A, DE HAAS D, KELLER J, *et al.* Methane formation in sewer systems[J]. *Water Research*, 2008, 42(6/7): 1421-1430.
- [2] SUN J, HU S H, SHARMA K R, *et al.* Stratified microbial structure and activity in sulfide- and methane-producing anaerobic sewer biofilms [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80 (22) : 7042-7052.
- [3] MOHANAKRISHNAN J, SHARMA K R, MEYER R L, *et al.* Variation in biofilm structure and activity along the length of a rising main sewer [J]. *Water Environment Research*, 2009, 81(8): 800-808.
- [4] SUN J, HU S H, SHARMA K R, *et al.* Impact of reduced water consumption on sulfide and methane production in rising main sewers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 154: 307-315.
- [5] YAN X F, SUN J, KENJIAHAN A, *et al.* Rapid and strong biocidal effect of ferrate on sulfidogenic and methanogenic sewer biofilms [J]. *Water Research*, 2020, 169: 115208.
- [6] AHYERRE M, CHEBBO G. Identification of in-sewer sources of organic solids contributing to combined sewer overflows[J]. *Environmental Technology*, 2002, 23(9): 1063-1073.
- [7] LIU Y W, TUGTAS A E, SHARMA K R, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments: field survey and model evaluation [J]. *Water Research*, 2016, 89: 142-150.
- [8] REN D H, ZUO Z Q, XING Y X, *et al.* Simultaneous control of sulfide and methane in sewers achieved by a physical approach targeting dominant active zone in sediments [J]. *Water Research*, 2022, 211: 118010.
- [9] CHEN H, WANG Z N, LIU H, *et al.* Variable sediment methane production in response to different source-associated sewer sediment types and hydrological patterns: role of the sediment microbiome [J]. *Water Research*, 2021, 190: 116670.
- [10] 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 等. 城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 [J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2252-2258.
SUN Guangxi, JIN Pengkang, SONG Jina, *et al.* Distribution characteristics of methanogens in urban sewer system [J]. *Environmental Science*, 2016, 37 (6): 2252-2258(in Chinese).
- [11] STURM K, YUAN Z, GIBBES B, *et al.* Methane and nitrous oxide sources and emissions in a subtropical freshwater reservoir, South East Queensland, Australia [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(18): 5245-5258.
- [12] 楚培齐, 王赛飞, 赵世广, 等. 甲烷催化燃烧反应机理及催化剂研究进展 [J]. *燃料化学学报*, 2022, 50 (2): 180-194.
CHU Peiqi, WANG Saifei, ZHAO Shiguang, *et al.* Research progress of reaction mechanism and catalysts on catalytic methane combustion [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2022, 50(2): 180-194(in Chinese).
- [13] LIU Y W, SHARMA K R, FLUGGEN M, *et al.* Online dissolved methane and total dissolved sulfide measurement in sewers [J]. *Water Research*, 2015, 68:

- 109-118.
- [14] 潘志强, 张建涛, 任广宝, 等. 气相色谱法测定环境空气中总烃、甲烷和非甲烷总烃 [J]. 分析仪器, 2021 (4): 66-69.
- PAN Zhiqiang, ZHANG Jiantao, REN Guangbao, *et al.* Determination of total hydrocarbon, methane and non-methane total hydrocarbon in ambient air by gas chromatography [J]. Analytical Instrumentation, 2021 (4): 66-69(in Chinese).
- [15] 周玉龙. 微型热导检测器的优化与制作研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- ZHOU Yulong. Optimization and Fabrication of Micro Thermal Conductivity Detectors [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022(in Chinese).
- [16] 赵德英. FID检测器气相色谱仪检定中常见问题及解决方法 [J]. 计量技术, 2018 (7): 69-70, 59.
- ZHAO Deying. Common problems & solutions for GC-FID calibration [J]. Metrology Science and Technology, 2018 (7): 69-70, 59(in Chinese).
- [17] FOLEY J, YUAN Z G, KELLER J, *et al.* N₂O and CH₄ Emission from Wastewater Collection and Treatment Systems [R]. USA: GWRC, 2015.
- [18] LIU Y W, NI B J, SHARMA K R, *et al.* Methane emission from sewers [J]. Science of the Total Environment, 2015, 524: 40-51.
- [19] 宋芳. 中红外激光甲烷传感技术研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2020.
- SONG Fang. Research of Mid-infrared Laser Methane Sensing Technique [D]. Jilin: Jilin University, 2020(in Chinese).
- [20] 郭岩宝, 刘承诚, 王德国, 等. 甲烷传感器气敏材料的研究现状与进展 [J]. 科学通报, 2019, 64(14): 1456-1470.
- GUO Yanbao, LIU Chengcheng, WANG Deguo, *et al.* Advances in the development of methane sensors with gas-sensing materials [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(14): 1456-1470(in Chinese).
- [21] LIU Y W, SHARMA K R, MURTHY S, *et al.* On-line monitoring of methane in sewer air [J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 6637.
- [22] LIU X, CHENG S, LIU H, *et al.* A survey on gas sensing technology [J]. Sensors, 2012, 12(7): 9635-9665.
- [23] 姚燕, 沈晓敏, 邱倩, 等. 基于GA-SVM的近红外光谱法预测有机废弃物生化甲烷潜力 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1857-1861.
- YAO Yan, SHEN Xiaomin, QIU Qian, *et al.* Predicting the biochemical methane potential of organic waste with near-infrared reflectance spectroscopy based on GA-SVM [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40 (6): 1857-1861(in Chinese).
- [24] 黄峰. In₂O₃等金属氧化物敏感材料的制备及其气敏性能研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.
- HUANG Feng. Preparation of In₂O₃ and Other Metal Oxide Sensing Materials and Their Gas Sensing Properties [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [25] 吴水平. 矿用甲烷传感器研究进展及存在的问题 [J]. 能源技术与管理, 2016, 41(5): 45-46, 98.
- WU Shuiping. Advances and challenges in mining methane sensor technology [J]. Energy Technology and Management, 2016, 41(5): 45-46, 98(in Chinese).
- [26] 马金鸣, 王魏男, 李小伟, 等. 均匀沉淀法制备高性能催化燃烧式甲烷传感器 [J]. 传感技术学报, 2011, 24(11): 1522-1525.
- MA Jinming, WANG Weinan, LI Xiaowei, *et al.* High performance methane sensors based on Pd/SBA-15 composite prepared by homogeneous deposition-precipitation method [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(11): 1522-1525(in Chinese).
- [27] 尹旭坤, 董磊, 马维光, 等. 石英增强光声光谱技术研究进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(3): 197-204.
- YIN Xukun, DONG Lei, MA Weiguang, *et al.* Research progress of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy technique [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(3): 197-204(in Chinese).
- [28] LIU Y W, NI B J, GANIGUÉ R, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments [J]. Water Research, 2015, 70: 350-359.
- [29] CHAOSAKUL T, KOOTATEP T, POLPRASERT C, *et al.* A model for methane production in sewers [J]. Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2014, 49(11): 1316-1321.
- [30] 张远. 城市污水管道甲烷检测与运移聚集规律研究 [D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2016.
- ZHANG Yuan. Research on Methane Detection and Transport Accumulation Patterns in Urban Sewage Pipelines [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016(in Chinese).

- [31] 方德琼. 山地城市污水管道中有害气体的检测及分布规律研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2012.
FANG Deqiong. Study on Detection of Harmful Gases and Distribution Law in the Mountain City Sewage Pipeline [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012 (in Chinese).
- [32] 刘艳涛. 污水管中有害气体的分布规律及其模型探究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
LIU Yantao. The Research of the Harmful Gas Distribution in Urban Sewage Pipe and Its Numerical Model [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016(in Chinese).
- [33] 季俊青. 兰州市生活排水系统废气产排量测算及控制对策研究 [D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.
JI Junqing. Domestic Drainage System of Lanzhou City Producing Exhaust Emission Estimates and Control Countermeasures [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013(in Chinese).
- [34] 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.
- [35] 张远, 吕淑然, 杨凯, 等. 城市污水管道甲烷爆炸防控对策研究现状及展望 [J]. 安全与环境工程, 2015, 22(5): 134–138.
ZHANG Yuan, LÜ Shuran, YANG Kai, *et al.* Research and prospects of the prevention and control measures of methane explosion in city sewers [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(5): 134–138(in Chinese).
- [36] 范小花, 丁允超. 城市污水管网气体爆炸风险评估 [J]. 工业安全与环保, 2016, 42(8): 32–34.
FAN Xiaohua, DING Yunchao. Risk assessment of gas explosion in the urban sewer [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42 (8) : 32–34 (in Chinese).
- [37] 杨洲, 张志强, 杨静, 等. 污水管道增强通风作用下氧气气液传质特性 [J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2055–2061.
YANG Zhou, ZHANG Zhiqiang, YANG Jing, *et al.* Investigation on oxygen gas-liquid mass transfer in sewage pipelines under enhanced ventilation [J]. Environmental Science, 2022, 43 (4) : 2055–2061 (in Chinese).
- [38] WANG J H, ZHANG J, XIE H J, *et al.* Methane emissions from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (9) : 5479–5485.
- [39] 张星, 陈敏东, 高庆先, 等. 生活污水处理厂甲烷的释放通量及其影响因素 [J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(3): 657–662.
ZHANG Xing, CHEN Mindong, GAO Qingxian, *et al.* Methane release flux from domestic sewage treatment plants and its influencing factors [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40 (3) : 657–662 (in Chinese).
- [40] GUISASOLA A, SHARMA K R, KELLER J, *et al.* Development of a model for assessing methane formation in rising main sewers [J]. Water Research, 2009, 43 (11): 2874–2884.
- [41] WILLIS J. GHG Methodologies for Sewer CH₄, Methanol-use CO₂, and Biogas-combustion CH₄ and Their Significance for Centralized Wastewater Treatment [D]. Queensland: The University of Queensland, 2017.
- [42] JIANG G M, GUTIERREZ O, SHARMA K R, *et al.* Effects of nitrite concentration and exposure time on sulfide and methane production in sewer systems [J]. Water Research, 2010, 44(14): 4241–4251.
- [43] JIANG G M, SUN J, SHARMA K R, *et al.* Corrosion and odor management in sewer systems [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2015, 33: 192–197.
- [44] FIRER D, FRIEDLER E, LAHAV O. Control of sulfide in sewer systems by dosage of iron salts: comparison between theoretical and experimental results, and practical implications [J]. Science of the Total Environment, 2008, 392(1): 145–156.
- [45] 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.

作者简介:王艺臻(1997–),女,山东潍坊人,在读硕士,主要研究方向为市政污水管网温室气体排放。

E-mail:nlzn3604@163.com

收稿日期:2022-11-04

修回日期:2022-12-23

(编辑:丁彩娟)