

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.006

污水管道中含碳有机物的时空分布特征及影响因素

赵航^{1,2}, 何星卓^{1,2}, 张志强^{1,2}, 黄雨洁^{1,2}, 卢金锁^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 挥发性有机物(VOCs)和甲烷(CH₄)作为重要的空气污染物与温室气体,显著影响环境质量及地球气候系统,因而实施有效减排措施对保护生态环境、实现气候目标至关重要。为探究污水管道中VOCs与CH₄浓度的时空分布特征及其关键影响因素,选取西安某高校内的小流域排水系统开展实地调研,长期监测管道内VOCs浓度、CH₄浓度、检查井温度及污水温度,并采集污水样本进行检测。基于调研与检测结果,分析得出气体浓度变化规律如下:两种气体浓度在污水管道中均呈现沿程递减趋势,且与检查井温度变化显著相关。最终,结合主成分分析(PCA)与多元回归分析方法,明确化学需氧量(COD)及检查井温度为VOCs与CH₄的主要影响因素,且二者影响程度随环境条件变化存在差异。

关键词: 污水管道; 挥发性有机物(VOCs); 甲烷(CH₄); 时空分布特征; 影响因素

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0038-08

Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of Carbon-containing Organic Matters in Sewage Pipes

ZHAO Hang^{1,2}, HE Xing-zhuo^{1,2}, ZHANG Zhi-qiang^{1,2}, HUANG Yu-jie^{1,2},
LU Jin-suo^{1,2}

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) and methane (CH₄), as significant air pollutants and greenhouse gases, exert substantial impacts on environmental quality and the earth's climate system. Implementing effective emission reduction measures is crucial for protecting the ecological environment and achieving climate goals. To investigate the spatiotemporal distribution characteristics of VOCs and CH₄ concentrations in sewage pipes and their key influencing factors, a small drainage network within a university campus in Xi'an City was selected for field investigation. Long-term monitoring was conducted on VOCs concentration, CH₄ concentration, temperature of inspection well and sewage within the pipes. Sewage samples were collected for testing. Based on the investigation and testing results, the analysis revealed the following patterns of gas concentration variation: concentrations of both gases exhibited a decreasing trend along the flow path within the sewage pipes and were significantly correlated with changes in inspection well temperature. Finally, employing a combination of principal component analysis

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203200)

通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@163.com

(PCA) and multiple regression analysis, chemical oxygen demand (COD) and inspection well temperature were identified as the primary influencing factors for both VOCs and CH₄. Furthermore, the degree of influence exerted by these two factors varied under different environmental conditions.

Key words: sewage pipe; volatile organic compounds (VOCs); methane (CH₄); spatiotemporal distribution characteristics; influencing factor

作为重要的非二氧化碳温室气体,挥发性有机物(VOCs)和甲烷(CH₄)对气候变化影响显著。污水管道系统是这两类气体常被低估的关键排放源,掌握其浓度时空分布规律及关键影响因素,是精准编制国家温室气体清单、识别排放热点的科学基础。有效控制管网中的VOCs与CH₄排放,不仅可直接削减高全球增温潜势(GWP)的CH₄,并抑制VOCs作为臭氧前体所产生的间接辐射强迫,还可通过减轻管道腐蚀降低维护活动衍生的隐含碳排放。因此,深入探究污水管道中VOCs与CH₄的排放特征及其主导因素,对于减少温室气体排放、推进水系统低碳化转型具有重要意义。

目前,城市排水管道大部分采用重力流,内部常存在沉积物和生物膜,二者均含大量有机质、无机盐和水,是管道内微生物生长赋存的主要来源,其中的微生物活动主导管道内CH₄的产生。受管道内氧气分布的影响,沉积物和生物膜的深层部位是产CH₄的关键位点,Sun等^[1]发现生物膜内部700 μm处的产甲烷古菌(MA)相对丰度达到75%。有研究显示,沉积物与生物膜产CH₄速率相当^[2-3],分别为2.68~15.01和(13.00±2.50) g/(m²·d)。有研究针对80 km的重力排水管道CH₄排放进行测算,夏季和冬季分别为135、78 kg/d,年平均排放量为8.8 t^[4]。排水管道产生的CH₄随污水的流动进入排水检查井并积聚于此。排水检查井遍布城市,是城市排水系统CH₄释放到大气的重要场所。现有研究对于城市的CH₄排放仅关注了污水处理厂、垃圾填埋场、发电厂、城市交通等“显性”CH₄排放,忽视了城市排水管道。苑心等人^[5]的研究表明,污水管道中的CH₄排放量高于部分污水处理厂的排放量。目前污水管道中CH₄的研究主要集中在CH₄的产生、排放及控制方面,而对其时空分布特征及影响因素的探讨尚显不足。

20世纪80年代,国内外学者对公有污水处理厂中VOCs的产生和浓度进行了多项研究,确定的

VOCs包括二氯甲烷、苯乙烯、甲苯以及不同类型的类苯化合物^[6],如氯苯、甲基苯和乙基苯。Ramírez等人^[7]分析了西班牙塔拉戈纳污水处理厂的气相样本,该污水处理厂接收来自几家化工厂和石化厂的排放物。在初沉后采集的样本中,挥发性有机化合物的浓度较高,包括丙烯腈(1 843 μg/m³),苯乙烯(408~574 μg/m³),氯仿(2.22~155 μg/m³),乙苯(20.5~96.9 μg/m³)和间、对二甲苯(35.3~136 μg/m³)。Wang等人^[8]研究了澳大利亚悉尼污水管道系统排放的VOCs,两个研究地点的氯仿、苯、甲苯、总二甲苯平均浓度分别为202.00、5.52、111.33、151.37 μg/m³和654.25、8.85、61.15、254.31 μg/m³。Pitiriciu等人^[9]通过直接采集气体样品分析,在污水管道检查井中检测到13种VOCs,包括但不限于氯仿(15~117 μg/m³)、四氯乙烯(0.88~2 410 μg/m³)、1,4-二氯苯(2.2~57 μg/m³)、甲苯(5.3~43 μg/m³)、二氯甲烷(0.6~22 μg/m³)和总二甲苯(0.48~4 μg/m³)。同时他们发现,使用亨利定律估计的VOCs气相浓度远低于污水管道中实际测得的浓度,这表明现有模型可能低估了这些污染物的实际影响。由此可以看出,大多污水管道中VOCs的研究集中于其主要成分,对具体分布特性的研究较少。

本研究以西安某高校内的排水系统为研究区域,对其进行长期监测及取样分析。为了明确污水管道中CH₄及VOCs的时空分布特征,通过短期(单日内气体浓度变化,简称日变化)和长期(数月内气体浓度变化,简称月变化)监测同一管段内CH₄及VOCs的浓度变化规律,探究其时间分布特点;并利用ArcGIS软件结合监测所得CH₄和VOCs浓度数据,探究两种气体浓度的沿程变化情况,以及分别在有无外部流量汇入条件下的主干管中气体浓度变化,以探究其空间分布特征;初步预测影响两种气体分布的环境因素。最后,为了进一步探究管道中CH₄及VOCs的主要影响因素,分析了同一排水干管有外加流量汇入和无外加流量汇入(即有无支管

汇入情况)两种工况下,三个不同时间段内的 CH_4 及VOCs浓度变化情况,并采用主成分分析(PCA)^[10]对复杂的数据集进行降维处理,以减少变量间的多重共线性并提取主要信息,且使用多元回归分析来确定影响 CH_4 和VOCs浓度的主要因素。

1 材料与方法

1.1 调研区域概况

在2024年3月—12月对西安某高校小流域排水系统进行了调研。调研区域管网位置如图1所示,其主干管流向由南至北、由西向东,排向污水处理厂,全长约1.4 km。该系统功能区完整(涵盖生活区、教学区、餐饮区),主干管管径约400 mm,支管管径约300 mm。主干管实测埋深为2.1~6.3 m,依据地面高程及埋深数据推算干管坡度均值约为0.04。管网健康状况较好,具备较完善的公共设施和相对独立的排水管网系统,现场调研未发现错接和漏接现象。



图1 调研区域管网分布

Fig.1 Pipe network distribution map of research area

在该区域进行系统摸排后,沿主干管流向上对分布在其间的31个检查井由南至北进行了统一编号。依据管网分布及功能代表性等因素,确定了16个主要监测点。以上监测点在前期调研初步检

测到甲烷和VOCs,其存在一定的变化规律性,表明该系统适合开展系统的调研分析研究。

1.2 取样方法

准备聚乙烯采样瓶若干,确保采样瓶干净且密封性能良好。现场取样时,先使用待采集的污水润洗做好标记的采样瓶2~3次,再盛装最终样品。采集水样时直接装满样品瓶直至溢出,以确保无空气残留。随后立即拧紧瓶盖并密封,防止样本泄漏或污染。对每个检查井重复上述润洗与采样步骤。将所采集的样品置于4℃下保存,并尽快送至实验室进行检测分析,以减少样品变质导致的数据偏差。

1.3 监测分析方法

1.3.1 气体监测

将各检测仪器伸入检查井内一定深度,分别测量井内 CH_4 、VOCs浓度以及温度与湿度,并在计划时间内完成测量与记录。使用到的检测仪器包括:Honeywell手持式PID检测仪、英思科M40复合式气体检测报警器、精创RC-4温度记录仪等。

1.3.2 水质检测

对采集到的样品及时进行分析,其中,COD:消解法,pH:上海雷磁酸度计,温度:温度计,电导率:上海雷磁电导率测定仪,ORP:上海雷磁氧化还原电位测定仪,DO:上海雷磁溶解氧测定仪等。

1.3.3 统计分析

采用PCA与多元线性回归相结合的方法探究对 CH_4 及VOCs浓度的影响因素。在PCA分析过程中,首先通过KMO检验评估数据适用性,KMO值大于0.6表明数据适合进行PCA(0.9以上为极佳)。主成分数量的确定依据累计解释方差达到90%或观察解释方差显著下降的拐点原则。随后,将提取出的主成分作为自变量,以 CH_4 及VOCs浓度为因变量,构建多元线性回归模型。此模型能够量化各主成分对目标气体浓度的影响程度,进而识别出驱动其变化的主要影响因素。

2 结果与讨论

2.1 污水管网中目标有机气体时空分布特征

2.1.1 空间分布特征

管网内VOCs及 CH_4 浓度的沿程变化如图2所示。VOCs与 CH_4 浓度均呈现出先减小后增大的趋势,受沿程各区域排污差异的影响,各支管对于主干管的VOCs和 CH_4 排放的贡献率各有不同。

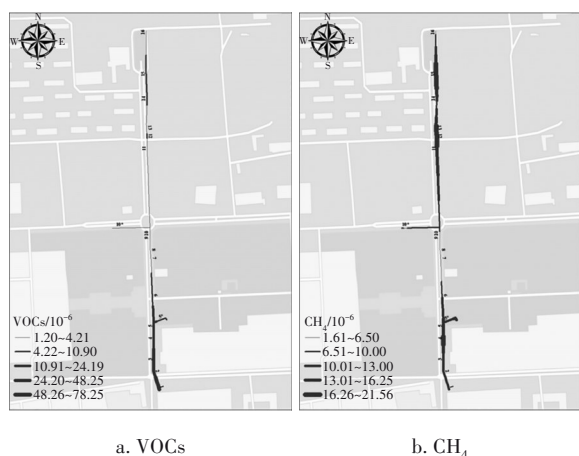


图2 VOCs及CH₄浓度沿程变化

Fig.2 VOCs and CH₄ concentrations along pipe network

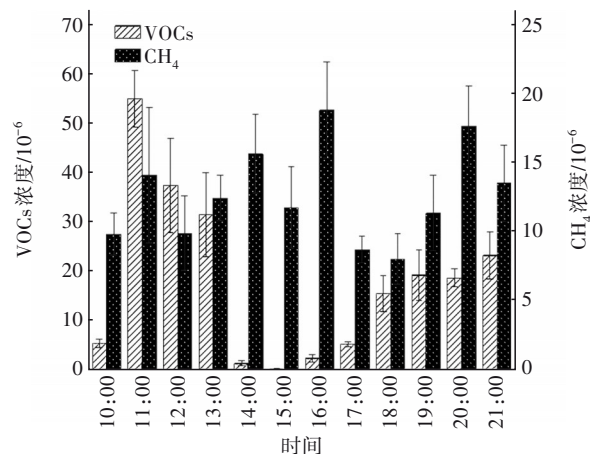
VOCs 浓度峰值出现在管网最上游的住宿区 1 检查井处。该区域汇集了生活区、餐饮区和办公区污水,其中餐饮废水产生大量 VOCs,导致污水有机负荷及初始 VOCs 浓度高。加之该位置流速较大,加速了溶解态 VOCs 向管道及检查井顶空气相的持续挥发(尤其是亨利定律常数高的组分),这可能是导致该处检测浓度显著高于其他管段的主要因素。主干管段 VOCs 浓度整体呈现沿程递减趋势。从住宿区 1 到图书馆北侧支管与住宿区 2 北侧支管交汇处区间,仅有教学区和图书馆支管汇入。该段污水来源相对单一(主要来自卫生间和实验室用水),产生的 VOCs 总量较少。同时,持续的挥发作用以及管道生物膜/沉积物中微生物的降解作用(对易降解组分如醇类、部分烷烃)共同导致了 VOCs 浓度的进一步自然损失。虽然生物降解在含氧区可能有贡献,但在普遍缺氧的污水管道中,其速率通常低于挥发速率。交汇处至下游住宅区段,尽管有图书馆(低 VOCs 污水)和住宿区 2(距汇合点远,流过程损耗较大)支管汇入,但交汇点附近检查井埋深大(约 8 m)、坡度大,限制了 VOCs 向井口的逸散,因此监测浓度仍处于较低水平。随着污水继续流向住宅区,汇入的生活污水包含更多餐饮废水和其他 VOCs 来源(如洗涤、洗浴废水),使得污水中 VOCs 浓度升高,相应地,其上方气相监测浓度也有所上升。

CH₄ 浓度沿程变化趋势与 VOCs 相似,初期也呈现递减趋势,但在流向职工住宅区的区段出现显著升高并持续维持高位。这缘于多个因素的叠加:管网起端住宿区 1、住宿区 2 和教学区污水汇入主干管

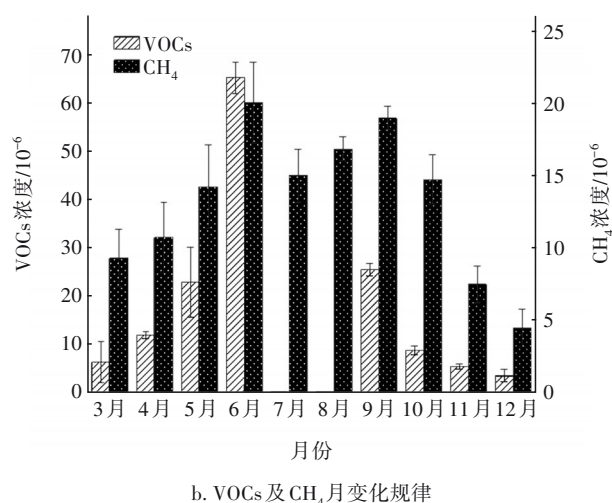
导致流速增大,促进了溶解态 CH₄ 的逸散及潜在的微小气泡释放过程;然而,与 VOCs 不同,CH₄ 因其密度(0.717 g/L)远小于空气(约 1.225 g/L),加之该区域(住宅区附近)检查井埋深较大(约 8 m),逸散和释放出的 CH₄ 不易扩散逃逸至大气,得以在管道顶空持续积累。同时,在污水向北流动过程中,西侧职工住宅区支管排出的大量生活污水携带了较高浓度的 CH₄ 汇入主干管,与上游来水混合,进一步推高了该区域的 CH₄ 浓度水平,形成了继住宿区 1 之后的又一显著峰值区。主干管整体的浓度递减过程可能主要由氧化作用所驱动——管道中(如近水面、入口附近或特定支管汇入点等)存在的好氧区或含甲烷氧化菌的微环境,在溶解氧(DO)参与下将 CH₄ 氧化为 CO₂ 和水,成为重要的削减途径之一。同时,低 CH₄ 浓度支流(如实验室、教学区特定废水)的汇入也对主干管进行了有效稀释。末段浓度最终下降,可归因于流速降低限制了气泡产生与逸散速率,以及持续进行的氧化与稀释作用的综合效应。

2.1.2 时间分布特征

VOCs 及 CH₄ 日变化规律如图 3(a) 所示。VOCs 浓度峰值出现在 11:00,体积分数约为 6×10^{-5} ,调研发现该现象主要是由备餐高峰期管网中有机物浓度升高所致。相比之下,CH₄ 浓度峰值出现在 16:00 左右,并在 12:00—16:00 期间维持较高水平,这是由于气温在此时段达到一天中的最高值,而高温加速了有机物分解,增加了 CH₄ 的生成。此外,20:00 时由于食堂清洗和学生洗漱活动,管网中有机物浓度再次升高,促使 CH₄ 浓度上升。因此,可以初步判定,VOCs 浓度主要受有机物排放量影响,而 CH₄ 浓度则受温度及有机物浓度双重因素的影响。



a. VOCs 及 CH₄ 日变化规律

图 3 VOCs 及 CH₄ 的时间分布特征Fig.3 Time distribution characteristics of VOCs and CH₄

VOCs 及 CH₄ 月变化规律见图 3(b), 可知 VOCs 浓度在 6 月达到峰值, 主要因为该月份温度高, 促进了 VOCs 从污水中的挥发。而在 7 月和 8 月出现断崖式下降, 原因是此时间段内学生放假, 大部分食堂关闭窗口, 厨余排放导致的污水管网内有机物浓度大幅减少, 从而使得 VOCs 浓度显著降低。这进一步证实了 VOCs 浓度主要受有机物浓度的影响。相比之下, 尽管有机物浓度在 7 月和 8 月降低, CH₄ 浓度并未显著下降, 因为虽然产甲烷主要由微生物活动驱动, 但在特定条件下 (如高温、高 pH), 管道内的无机化合物之间可能发生化学反应, 间接促进 CH₄ 的形成。在 3 月—12 月 CH₄ 浓度变化趋势与温度变化趋势相近, 这说明与有机物浓度相比, 温度对 CH₄ 生成的影响相对更为显著。

2.2 污水管道 CH₄ 和 VOCs 浓度影响因素

以污水样本的 COD、电导率、DO、井内温度、井

内湿度、污水温度以及氧化还原电位 (ORP) 作为自变量, 将污水管道中的 CH₄ 及 VOCs 浓度作为因变量, 采用 PCA 和多元回归分析探究上述环境参数对 CH₄ 及 VOCs 排放的影响。由于 VOCs 浓度随时间变化明显, CH₄ 浓度则相对变化较小, 故分析时间段的选取主要根据 VOCs 来确定, 分别为 11:00—13:00、16:00—18:00 和 19:00—21:00 (记作 1[#]、2[#]、3[#])。

2.2.1 无外加流量条件下的主要影响因素

在 KMO 和巴特利特检验中, 三个时段的 KMO 取样适切性量数分别为 0.678、0.742、0.645, 巴特利特球形度检验 (自由度均为 21) 的近似卡方数分别为 168.502、114.695、93.581, 显著性水平均为 0.000 (<0.05), 证实了 PCA 的统计有效性。

根据 Kaiser 准则, 特征值大于 1 表示该主成分的方差贡献大于原始变量的平均方差, 故选择保留特征值大于 1 的主成分。因此, 在 11:00—13:00, 7 个原始变量被归纳为两个主成分, 共同解释总方差的 87.398% (见表 1)。成分 1 包含井温、DO、水温 and 井湿 (权重分别为 0.984、-0.954、0.929、0.712), 其中井温贡献率最高, 主导该成分的形成; 成分 2 涵盖 COD、电导率和 ORP (权重分别为 0.974、0.964、-0.937), COD 为关键影响因子。随后, 基于主成分得分, 将成分 1 和成分 2 作为自变量与挥发性有机物及 CH₄ 浓度进行多元回归分析, 建立线性模型。模型 R² 值 (VOCs: 0.841, CH₄: 0.799) 表明解释力良好, 德宾-沃森值 (分别为 1.179、1.779) 确认残差无自相关, 模型可靠。

标准化系数分析 (见表 2) 表明, VOCs 主要受成分 1 驱动, 井温为核心影响参数; 而 CH₄ 由成分 2 主导, COD 贡献最为显著。

表 1 总方差解释 (无外加流量)

Tab.1 Total variance interpretation (no external flow)

时段	成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
		总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1 [#]	1	4.318	61.681	61.681	4.318	61.681	61.681	3.106	44.369	44.369
	2	1.800	25.717	87.398	1.800	25.717	87.398	3.012	43.028	87.398
	3	0.740	10.568	97.966	—	—	—	—	—	—
2 [#]	1	4.346	62.089	62.089	4.346	62.089	62.089	3.221	46.012	46.012
	2	1.500	21.435	83.524	1.500	21.435	83.524	2.626	37.512	83.524
	3	0.792	11.309	94.833	—	—	—	—	—	—
3 [#]	1	4.134	59.064	59.064	4.134	59.064	59.064	3.306	47.229	47.229
	2	1.582	22.596	81.660	1.582	22.596	81.660	2.410	34.432	81.660
	3	0.651	9.296	90.956	—	—	—	—	—	—

表2 多元回归分析系数(无外加流量)

Tab.2 Multiple regression analysis coefficient (no external flow)

时段	模型		未标准化系数	标准错误	标准化系数	显著性
1 [#]	VOCs	常量	49.583	4.610	—	0.000
		成分1	19.808	4.752	0.444	0.001
		成分2	35.791	4.752	0.802	0.000
	CH ₄	常量	13.759	0.799	—	0.000
		成分1	4.360	0.823	0.635	0.000
		成分2	4.324	0.823	0.629	0.000
2 [#]	VOCs	常量	14.813	0.832	—	0.000
		成分1	3.133	0.858	0.396	0.003
		成分2	-6.518	0.858	-0.824	0.000
	CH ₄	常量	13.112	0.781	—	0.000
		成分1	4.373	0.805	0.802	0.000
		成分2	-1.246	0.805	-0.228	0.040
3 [#]	VOCs	常量	28.800	2.501	—	0.000
		成分1	19.213	2.578	0.764	0.000
		成分2	13.034	2.578	0.518	0.000
	CH ₄	常量	16.144	1.253	—	0.000
		成分1	4.912	1.292	0.513	0.002
		成分2	6.645	1.292	0.694	0.000

该时段结论进一步扩展:在 16:00—18:00,成分 1 包含井温(0.962)、水温(0.952)、DO(-0.726),成分 2 包含 COD(0.846)、ORP(-0.751)、井湿(0.726)和电导率(0.689),VOCs 主控因素为 COD 及 ORP,CH₄为井温及水温;在 19:00—21:00,成分 1 包含 COD、电导率、ORP 和井湿(权重分别为 0.931、

0.890、-0.890、0.730),成分 2 涵盖井温、DO、水温(权重分别为 0.903、-0.868、-0.782),VOCs 主控因素为 COD 及电导率,CH₄为井温及 DO。综上,在无外加流量下,VOCs 主要受 COD 驱动,CH₄受井温主导,这与 2.1.2 节的预测一致,验证了假设的有效性,并通过 PCA 与回归分析的系统性结果得到支撑。

2.2.2 外加流量条件下的主要影响分析

在 KMO 和巴特利特检验中,三个时段的 KMO 取样适切性量数分别为 0.773、0.612、0.758,巴特利特球形度检验(自由度均为 21)的近似卡方数分别为 158.347、91.136、107.661,显著性水平均为 0.000(<0.05),同样证实了 PCA 的统计有效性。

同样根据 Kaiser 准则,保留特征值大于 1 的主成分。在 11:00—13:00,7 个原始变量被归纳为两个主成分,共同解释总方差的 88.430%(见表 3)。其中,成分 1 包含井温、DO 和水温,权重分别为 0.960、-0.952、0.881;成分 2 包含 COD、电导率、ORP 和井湿,权重分别为 0.984、0.888、-0.879、0.503。在 16:00—18:00,7 个原始变量被归纳为三个主成分,其中,成分 1 包含井湿(0.943)、电导率(0.864)和 DO(-0.745),成分 2 包含井温(0.945)和水温(0.909),成分 3 包含 COD(0.896)和 ORP(-0.881)。在 19:00—21:00,7 个原始变量被归纳为两个主成分,其中,成分 1 包含 COD(0.966)、电导率(0.864)、ORP(-0.839)和井湿(0.825),成分 2 包含井温(0.860)、DO(-0.831)和水温(0.759)。

表3 总方差解释(外加流量)

Tab.3 Total variance interpretation (external flow)

时间段	成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
		总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1 [#]	1	4.797	68.530	68.530	4.797	68.530	68.530	3.153	45.036	45.036
	2	1.393	19.900	88.430	1.393	19.900	88.430	3.038	43.394	88.430
	3	0.648	9.258	97.689						
2 [#]	1	3.719	53.127	53.127	3.719	53.127	53.127	2.462	35.166	35.166
	2	1.575	22.497	75.624	1.575	22.497	75.624	2.308	32.974	68.140
	3	1.164	16.633	92.257	1.164	16.633	92.257	1.688	24.117	92.257
	4	0.234	3.346	95.603						
3 [#]	1	4.357	62.239	62.239	4.357	62.239	62.239	3.400	48.572	48.572
	2	1.426	20.374	82.613	1.426	20.374	82.613	2.383	34.041	82.613
	3	0.698	9.971	92.584						

与 2.2.1 节类似,所建立线性模型的 R² 值表明解释力良好,德宾-沃森值确认残差无自相关,模型可靠。与上述分析相似,在 11:00—13:00,对于 VOCs

和 CH₄,成分 2 的影响更显著(见表 4)。结合各成分中自变量的贡献情况,最终确定 VOCs 和 CH₄ 的主要影响因素均为 COD 及电导率。在 16:00—18:00,对

于VOCs,成分3的影响更显著;而对于CH₄,成分2的影响更大。结合各成分中自变量的贡献情况,最终确定VOCs的主要影响因素为COD及ORP,CH₄的主要影响因素为井温及水温。在19:00—21:00,对于VOCs,成分1的影响更显著;而对于CH₄,成分2的影响更大。结合各成分中自变量的贡献情况,确定VOCs的主要影响因素为COD浓度及电导率,CH₄的主要影响因素为井温及DO浓度。

表4 多元回归分析系数(外加流量)

Tab.4 Multiple regression analysis coefficient
(external flow)

时段	模型		未标准化系数	标准错误	标准化系数	显著性
1 [#]	VOCs	常量	41.944	3.466	—	0.000
		成分1	20.356	3.573	0.440	0.000
		成分2	39.353	3.573	0.850	0.000
	CH ₄	常量	16.016	0.383	—	0.000
		成分1	4.303	0.395	0.674	0.000
		成分2	4.482	0.395	0.702	0.000
2 [#]	VOCs	常量	15.038	1.084	—	0.000
		成分1	-5.005	1.118	-0.567	0.001
		成分2	3.303	1.118	0.374	0.011
		成分3	5.074	1.118	0.575	0.001
	CH ₄	常量	14.206	0.817	—	0.000
		成分1	0.093	0.842	0.015	0.046
		成分2	5.182	0.842	0.849	0.000
		成分3	1.068	0.842	0.175	0.004
3 [#]	VOCs	常量	30.965	2.123	—	0.000
		成分1	21.300	2.188	0.800	0.000
		成分2	13.722	2.188	0.515	0.000
	CH ₄	常量	20.296	0.876	—	0.000
		成分1	4.476	0.903	0.513	0.000
		成分2	6.673	0.903	0.766	0.000

如图2所示,在支管汇入点(图书馆北侧、住校区2北侧、职工住宅区)附近常监测到VOCs和CH₄浓度的显著波动,这种空间变化部分缘于外加流量的冲击效应。当高COD/高CH₄潜力的支流(如餐饮废水)汇入时,水流冲击通过瞬时提升局部COD浓度增加VOCs挥发底物,同时扰动沉积物释放吸附态VOCs或封存CH₄气泡,也能增强紊流加速溶解态CH₄逸散,共同推高气体浓度;反之,低有机物支流(如实验室废水)汇入则以稀释效应主导浓度下降(如图书馆北侧交汇点)。PCA与回归分析进一步表明,在冲击条件下,虽然VOCs和CH₄的主控因子

仍分别为COD与井温,但二者与其他参数(VOCs关联ORP/电导率,CH₄关联DO)的关联性呈现时段性波动。这揭示水流冲击通过改变局部微环境,例如瞬时调整DO分布(可能增强CH₄氧化)、扰动沉积物改变ORP、混合水体影响电导率(间接调控VOCs溶解/挥发平衡),从而动态影响气体生成转化速率,最终导致局部波动。综上,整个研究时段内外加流量条件下,VOCs排放量主要受COD调控,而CH₄变化主要由井温主导。

2.3 污水管道CH₄和VOCs浓度变化

监测时段覆盖春、夏、秋三季,数据表明VOCs浓度于6月(夏初)出现峰值(高温促进挥发),但在7月—8月(暑假)随有机物负荷降低而显著下降,直接印证了COD的主控作用;CH₄浓度虽在6月达峰,7月—8月却未随COD明显下降,凸显温度持续驱动其生成与释放的特性;至秋季二者总体随气温降低呈下降趋势。然而,因未监测冬季(12月后),尚缺该季实证。据陈浩^[4]研究,城市排水管道冬季CH₄排放量(78 kg/d)显著低于夏季(135 kg/d),主要是低温抑制了产甲烷菌的活性;同理低温也将减少VOCs挥发。故可推测本系统冬季浓度将低于秋季值,且温度抑制作用更显著,此推论与Guisasola等^[3]模型预测相符。综上,COD主导VOCs、温度主导CH₄在春、夏、秋季已得到验证——尤其通过暑假期间VOCs骤降而CH₄稳定的现象得以明晰区分,但冬季数据缺失限制全年普适性验证,未来需包含严冬的完整年度监测以全面评估极端低温对气体排放特征及主控因子季节强度的影响。

研究观测到的VOCs和CH₄浓度沿程递减趋势,与Wang等^[8]报道的在悉尼污水管道系统中某些VOCs(如苯、甲苯)浓度随距离降低的现象一致,共同证实了挥发(VOCs)和逸散/氧化(CH₄)作为沿程主导损失机制的普遍性。其中,VOCs浓度主要受COD驱动,这与污水有机物负荷是其主要来源的共识^[6-7,9]相符。Pitiriciu等^[9]观察到实际管道VOCs浓度常高于亨利定律预测值,强调了生物过程与吸附/解吸平衡的重要性,进一步支持了COD作为源头关键指标的关联性。对于CH₄,其浓度主要受温度影响,该结论获得Guisasola等^[3](温度促进产甲烷速率)及Liu等^[2](高温增加沉积物CH₄产率)研究的支持,观测的CH₄夏季(6月)峰值也与陈浩^[4]报道的夏季排放高于冬季的结论吻合。此外,本工作聚焦焦

查井顶空气体浓度,呼应了苑心等^[5]关于城市排水管道(尤其是检查井)作为重要却常被低估的CH₄排放源的观点,凸显了本研究对象的实际意义。

3 结论

① VOCs及CH₄浓度沿管线递减,VOCs浓度在11:00—13:00最高,CH₄浓度在14:00—16:00最高,且二者在6月份达到峰值。

② 在无外加流量条件下,VOCs浓度主要与污水中的COD浓度相关,COD越高,VOCs逸散越多;CH₄浓度在一天时间内的影响因素主要为井温。

③ 在外加流量汇入条件下,水流冲击通过瞬时提升局部COD浓度、扰动沉积物、增强水体紊动等方式,导致VOCs和CH₄浓度出现局部波动,并可能引起次要影响因子(如ORP、DO、电导率)关联性的动态变化。尽管如此,PCA与回归分析表明,污水中有机物负荷(COD)和管道微环境(井温)始终分别是VOCs和CH₄浓度的最主要驱动因素。

④ 研究存在一定局限,即监测时段未覆盖完整年度(尤其缺冬季),制约了对气体排放长期规律及极端事件响应的认知;监测区域仅为单一高校小流域,限制了研究结果的外推性;受技术条件所限,未能系统解析具体VOCs种类。因此,未来研究应开展长期连续监测以揭示完整年际/季节规律,并实施多区域(不同功能区/管网条件)对比,同时深化VOCs组分识别、来源解析及气体传输转化机理建模。基于初步认知,建议未来可加强管网清淤减少沉积物积累,在关键节点优化设计(如增设通风、吸附或收集设施),并推动源头减少高有机废物入管。

参考文献:

- [1] SUN J, HU S H, KESHAB R S, *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.
- [2] LIU Y W, TUGTASA E, KESHAB R S, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments: field survey and model evaluation [J]. *Water Research*, 2016, 89: 142–150.
- [3] GUISASOLA A, DE HAAS D, KELLER J, *et al.* Methane formation in sewer systems [J]. *Water Research*, 2008, 42(6/7): 1421–1430.
- [4] 陈浩. 市政排水管道CH₄产排及其影响因子研究综述[J]. *能源环境保护*, 2020, 34(6): 14–20.
- CHEN Hao. A research overview on production, emission and influencing factors of methane in municipal drainage pipeline [J]. *Energy Environmental Protection*, 2020, 34(6): 14–20 (in Chinese).
- [5] 苑心, 李轩, 胡言午, 等. 隐形的地下碳源: 城市排水管道CH₄排放[J]. *给水排水*, 2022, 48(9): 139–146.
- YUAN Xin, LI Xuan, HU Yanwu, *et al.* Potential carbon emission source underground: fugitive methane emission in the urban sewers [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(9): 139–146 (in Chinese).
- [6] NIU Z G, XU S Y, GONG Q C. Health risk assessment of odors emitted from urban wastewater pump stations in Tianjin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21 (17): 10349–10360.
- [7] RAMÍREZ N, MARCÉ R M, BORRULL F. Determination of volatile organic compounds in industrial wastewater plant air emissions by multi-sorbent adsorption and thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2011, 91(10): 911–928.
- [8] WANG B, SIVRET E C, PARCSI G, *et al.* Characterising volatile organic compounds from sewer emissions by thermal desorption coupled with gas-chromatography-mass spectrometry [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 30: 73–78.
- [9] PITIRICIU M, TANSEL B. Volatile organic contaminants (VOCs) emitted from sewer networks during wastewater collection and transport [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112136.
- [10] 张国珍, 高广辉, 汪光宗, 等. 西北高寒牧区水质评价与重金属健康风险评估[J]. *中国给水排水*, 2023, 39 (11): 42–48.
- ZHANG Guozhen, GAO Guanghui, WANG Guangzong, *et al.* Water quality assessment and heavy metal health risk evaluation in northwest alpine pastoral area [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39 (11): 42–48 (in Chinese).

作者简介: 赵航(1992–), 男, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 从事污水管道有害气体风险控制研究。

E-mail: zhaohang@xauat.edu.cn

收稿日期: 2025-06-28

修回日期: 2025-07-18

(编辑: 李德强)