



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202304099

中图分类号 X703

文献标识码 A

刘建国, 吕金鑫, 李文凯, 等. 农村重力流灰水收集系统的恶臭气体时空分布规律[J]. 环境工程学报, 2023, 17(8): 2565-2575. [LIU Jianguo, LYU Jinxin, LI Wenkai, et al. Spatial and temporal distribution patterns of malodorous gases in rural gravity-flow graywater collection systems[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(8): 2565-2575.]

农村重力流灰水收集系统的恶臭气体时空分布规律

刘建国¹, 吕金鑫^{1,2}, 李文凯³, 朱畅^{1,2}, 门颖欣¹, 胡凡¹, 郑天龙^{2,✉}, 曹英楠^{1,2,✉}, 刘俊新²

1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 环境污染控制与修复内蒙古自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010051; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 水污染控制实验室, 北京 100085; 3. 陕西建工第十二建设集团有限公司, 安康 725000

摘要 为探究农村重力流灰水收集系统的恶臭气体时空分布规律, 构建了一套中试研究装置并研究了其全流程的恶臭气体质量浓度。结果表明: 在相对静止的灰水储水池中, 苯乙烯(C₈H₈)是质量浓度最高的恶臭气体(平均质量浓度为 55.68 mg·m⁻³), 二硫化碳(CS₂)的质量浓度最低(平均质量浓度为 0.11 mg·m⁻³); 灰水收集系统在早晨(6:00—8:00)和傍晚(17:00—19:00)的恶臭气体质量浓度较高, 其 OU 平均值分别是其他时段 OU 平均质量浓度的 1.82~23.7 倍和 1.87~24.41 倍; 灰水收集系统中的跌水井和管道变径处是恶臭气体质量浓度较高的区域, 其 OU 平均值分别是其上下游区域 OU 平均值的 1.2 倍和 1.6 倍。在农村重力流灰水收集系统的运维过程中, 应该关注 C₈H₈ 和 C₂SH₆ 等气体的浓度变化以更好的控制恶臭逸散问题。

关键词 灰水; 收集系统; 恶臭; 时间分布; 空间分布

农村生活污水按照其污水来源和水质特征的不同, 可以分为黑水和灰水两大类^[1], 其中黑水是含有粪便和尿液的污水, 其污染物质量浓度高、氮磷含量丰富, 适合进行农田资源化利用^[2-4], 灰水主要包括餐厨污水、洗涤污水和洗浴污水等, 其污染物质量浓度较低, 适合进行收集处理后排放^[5-7]。针对黑水和灰水的特点, 许多农村地区开展了黑水和灰水的分质收集, 即采用化粪池收集处理黑水用于农田利用, 采用重力流排水系统单独收集灰水进行处理并排放^[8-10]。

排水系统在输送污水的过程中, 污水中一部分悬浮微生物会附着在系统内壁并利用污水中的有机物进行生长繁殖, 逐渐形成管道生物膜^[11-12]。污水中的悬浮微生物和管道生物膜共同作用可以去除污水中的部分有机物, 产生一定的污水预处理效果^[13-15], 但同时也会产生 H₂S 和 CH₄ 等气体产物^[16-17]。其中, H₂S 是具有恶臭的有毒气体^[12,18], 其与污水中携带并逸散到排水系统气相中的其他恶臭气体在排水系统内的聚集可能影响周边居民的正常生活^[19-21]。除 H₂S 以外, 恶臭气体还包括苯乙烯(C₈H₈)、氨气(NH₃)、三甲胺(C₃H₉N)、二甲基二硫醚(C₂H₆S₂)、甲硫醚(C₂SH₆)等^[18,22-23], 其在排水系统中的积聚和逸散是一个在工程实践过程中普遍发生的问题。为解决这一问题, 有关研究

收稿日期: 2023-04-23; 录用日期: 2023-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51838013); 陕西省创新能力支撑计划项目(2022KJXX-14)

第一作者: 刘建国(1980—), 男, 博士, 教授, liujianguo863@163.com; ✉通信作者: 郑天龙(1988—), 男, 博士, 副研究员, tlzheng@rcees.ac.cn; 曹英楠(1980—), 女, 博士, 副教授, caoyingnan@imut.edu.cn

团队开展了一系列研究^[24-26],指出了灰水收集系统具有H₂S等恶臭气体积聚的风险^[17,27]。但除H₂S以外,灰水收集系统的气相中是否还存在其他恶臭气体仍有待确认。更进一步的,灰水收集系统中恶臭气体的分布规律尚不明晰,限制了灰水收集技术的改良和运维管理措施的优化,亟待开展相关研究。

为获得农村灰水收集系统的恶臭气体分布及传输规律,本研究以相关中试装置为载体,利用恶臭分析仪器和数理统计方法探究装置全流程的恶臭气体时空分布规律,以为农村重力流灰水收集系统的技术优化和运维管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

1) 灰水管道实验装置。中试装置(图1)由储水池(1 m×1 m×3 m, 混凝土)、集水箱(ϕ 500 mm×80 mm, HDPE)、跌水井(ϕ 315 mm×200 mm, PE 检查井; ϕ 315 mm×2.5 mm, HDPE 波纹管)、UPVC 排水管道(ϕ 110 mm×2.8 mm, ϕ 160 mm×2 mm, 联塑, 中国)、PVC 检查口(235 mm×110 mm×95 mm, 278 mm×160 mm×95 mm, 联塑, 中国)、PE 转向检查井(ϕ 315 mm×200 mm, 世腾)、PE 直通检查井(ϕ 315 mm×200 mm, 世腾)、回水池(1 m×1 m×3 m, 混凝土)和蠕动泵(WT600-4F, 兰格)组成,单套管线长度为30 m, 管线装置坡度设置为10‰, 在每个检查井与跌水井在井盖处进行打孔以模拟污水检查井的井孔(图2)。

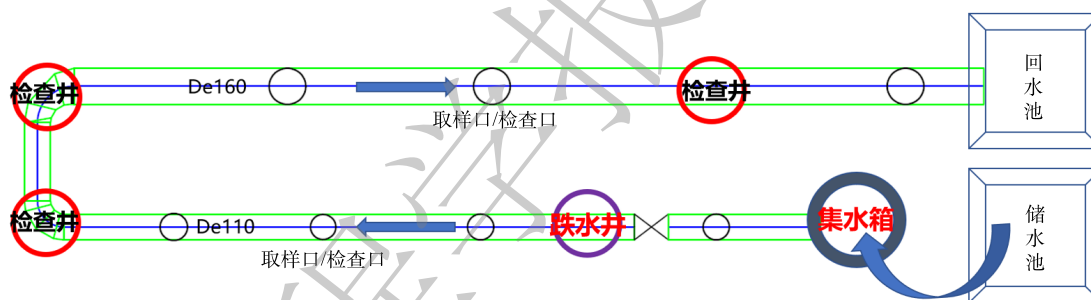


图1 实验中试系统组成

Fig. 1 Composition of experimental pilot system

2) 实验用水及运行条件。本实验用水采用农村真实灰水,基本水质参数见表1。根据农村地区污水产排特征及《农村生活污水处理技术验证评价规范 T/CSES 19-2021》,本装置设计灰水收集规模为1 t,即服务户数为10户,每户3~4人,排水量为每人25 L·d⁻¹。为准确反映农村排水的周期性,本装置采用时变流,如图3所示。

1.2 恶臭检测点位、检测指标与检测方法

1) 检测点位。对装置沿程进行恶臭布点检测,检测点位分为开放与封闭2个区域,其中开放区域包括储水池、集水箱、跌水井、检查井、回水池等,封闭区域包括管道检查口(3个),如图1所示。除储水池(储水池单独检测)外,其余点位的检测时间为每天的5:00—6:00、6:00—8:00、11:00—13:00、17:00—19:00、22:00—23:00,检测时长为一个月(8月3日—9月3日,每周检测4次,每次单个点位检测3次)。

2) 检测指标与检测方法。恶臭检测指标分别为臭气(OU)、硫化氢(H₂S)、苯乙烯(C₈H₈)、氨气(NH₃)、三甲胺(C₃H₉N)、二甲基二硫醚(C₂H₆S₂)、甲硫醚(C₂SH₆)^[15-16,21],采用PTM600手提式气体分析仪(深圳市逸云天电子有限公司,中国)进行检测^[28]。对储水池恶臭的具体检测方法如图4所示,将气体分析仪吸气管分别放在距离地面1.5、1.2、1.0、0.7、0.5、0.3 m处测3次,取平均值。



图 2 实验中试系统组成实物图

Fig. 2 Physical diagram of the composition of the experimental pilot system

表 1 灰水水质参数

Table 1 Grey water quality parameters

检测结果	pH	COD/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	DO/(mg·L ⁻¹)	硫化物/(mg·L ⁻¹)
范围	6.52-7.58	214-459.5	9.83-42.91	22.83-69.43	0.9-1.5	1.9-4.5	4.24-9.94
均值	7.05	361.78	31.28	49.85	1.21	3.1	6.3

对其他点位恶臭的检测方法为直接将气体分析仪吸气管放入污水收集系统排气口处进行检测。检测数据采用 SPSS 软件进行差异显著性检验 (非参数 Kruskal-Wallis H 检验, $P<0.05$) 和相关性分析 (Spearman 相关性, $P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 灰水恶臭气体分布特征

灰水储水池中的恶臭气体分布情况可以反映灰水在相对静止状态下的恶臭气体逸散情况, 是

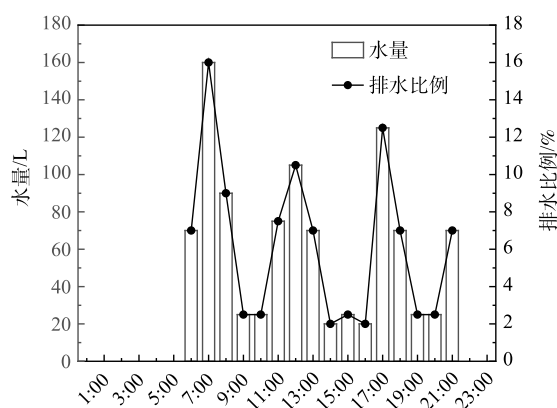


图3 农村污水设计水量图

Fig. 3 Design water volume diagram of rural sewage

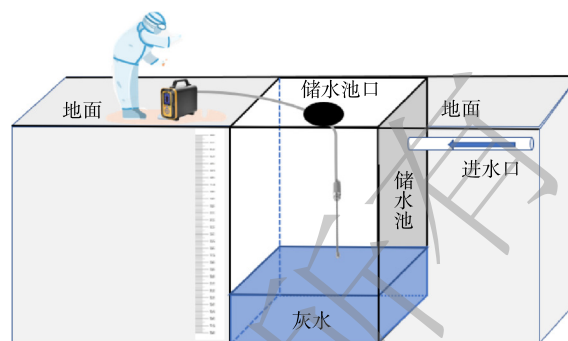


图4 灰水储水池采样图

Fig. 4 Sampling diagram of grey water storage tank

灰水的本征恶臭气体逸散特征。由检测结果可知，储水池中 H_2S 、 $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$ 和 NH_3 的最大质量浓度在距离地面 0.5 m 处，平均质量浓度分别为 7.81 、 6.62 和 $14.98 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；最小质量浓度在距离地面 0.3、1.5 和 0.3 m 处，平均质量浓度分别为 6.94 、 5.03 和 $11.33 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 5)。 CS_2 的最大质量浓度在距离地面 1.2 m 处，平均质量浓度为 $0.22 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最小质量浓度在距离地面 0.3 m，平均质量浓度为 $0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 C_8H_8 、 $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}_2$ 和 C_2SH_6 的最大质量浓度区域分别为距离地面 1.0、0.5 和 0.5 m 处，平均质量浓度分别为 58.15 、 20.27 和 $36.63 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；三者的最小质量浓度区域均为距离地面 0.3 m 处，平均质量浓度分别为 51.2 、 19.12 和 $33.69 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在静止的灰水储水池中，异味气体中 CS_2 的相对密度最高，为 $2.64 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，故所检测质量浓度的最高值出现在距离地面最远点，即主要分布于相对下方的空间； NH_3 ($0.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 相对密度最小，其较高质量浓度值距离地面较近，即主要分布于相对上方的空间。恶臭气体的分布规律为：从水面到地面，恶臭气体的总体质量浓度趋势为先升高再降低，与张涛等研究趋势相同^[23]。恶臭气体质量浓度分别为 $\text{C}_8\text{H}_8 > \text{C}_2\text{SH}_6 > \text{C}_2\text{H}_6\text{S}_2 > \text{NH}_3 > \text{H}_2\text{S} > \text{C}_3\text{H}_9\text{N} > \text{CS}_2$ 。KNIGHT 等^[29] 对 C_8H_8 在排水管道中的排放量进行了评估并确认了其存在潜在的暴露风险。本研究发现 C_8H_8 是灰水储水池中质量浓度最高的恶臭气体，其次是 C_2SH_6 ，而 CS_2 产生的恶臭质量浓度最低。WANG 等^[30] 研发发现排水系统中质量浓度最高的异味气体是 H_2S ($1\ 990.5 \sim 20\ 898 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 或者 $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}_2$ ($675 \sim 11\ 380.2 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。SIVRET 等^[31] 对不同地区排水管道异味气体进行调研发现，质量浓度最高的异味气体为 H_2S 和甲硫醇 (CH_4S) ($293 \sim 18\ 300 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。PANDEY 等^[32] 调查了污水井和雨水井，发现质量浓度最高的异味气体也是 H_2S 和 CH_4S 。此外，HUANG 等^[33] 在下水道中鉴定出

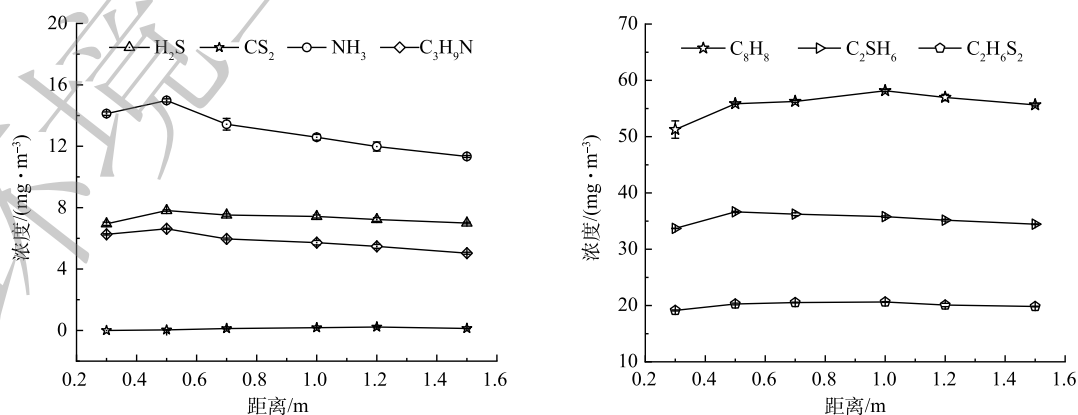


图5 农村灰水恶臭气体分布情况

Fig. 5 Distribution of odor gas in rural grey water

量浓度最高的异味气体为挥发性有机物 (VOCs), 具体包括卤代化合物、芳香类化合物和烷烃。因此, 不同时间、不同地区的排水系统的异味种类、质量浓度各有不同。 C_8H_8 属于苯系物中的一种, TEIXEIRA 等^[34] 对污水处理厂室内空气进行了评价, 在 VOCs 中甲苯的质量浓度最高, 说明苯系物与污水存在直接关联^[35]。苯系物属于内分泌干扰物^[36-37], 其具有毒性且挥发性高, 易被肺吸吸进而对人类健康造成不良影响, 因此, 在灰水重力流收集系统中, C_8H_8 是一项需要重点关注的指标。灰水储水池的臭气 (OU) 变化趋势为: 从水面到地面, OU 先上升再下降, 灰水的最大 OU 在距离地面 0.5 m 处, 为 4 408, 最小 OU 在距离地面 0.3 m 处, 为 4 007(图 6)。灰水储水池的臭气在贴近水面处质量浓度最低, 臭气主要集中储水池距离地面约 0.5 m 处, 因此, 在工人下池检修前, 不仅要检测对储水池贴近水面处的有害气体进行检测, 也要重点关注池体上边缘下方 0.5 m 处的有害气体质量浓度。

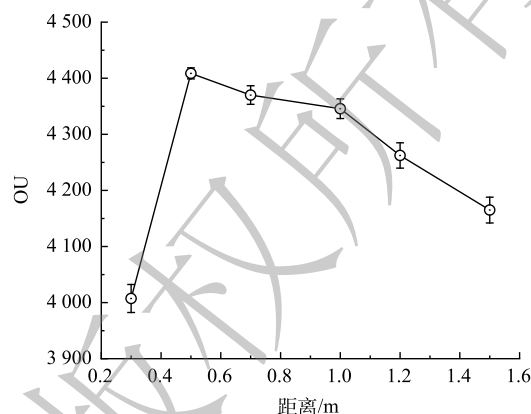


图 6 农村灰水臭气质量浓度分布情况

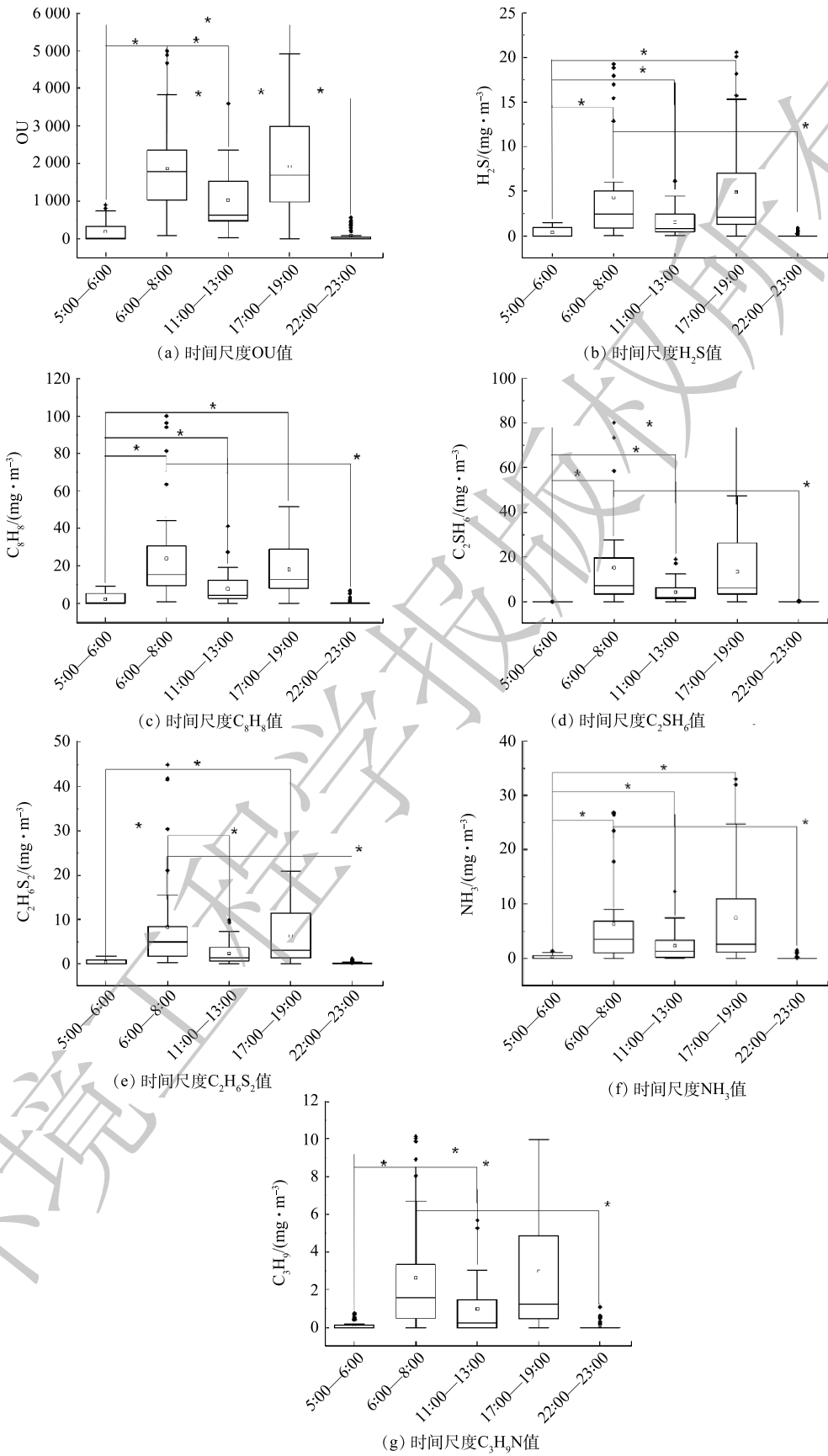
Fig. 6 Distribution of odor concentration in rural gray water

2.2 时间尺度恶臭气体分布规律

农村重力流灰水收集系统的恶臭气体在不同时间段的分布规律如图 7 所示。恶臭气体的总体质量浓度分布规律为“M”形, 即早晨 (7:00—8:00) 以及傍晚 (17:00—18:00) 恶臭气体质量浓度较高, 其 OU 平均值分别是其他时段 OU 平均值的 1.82~23.7 倍和 1.87~24.41 倍, 中午 (12:00—13:00) 恶臭气体质量浓度相对较低, 而清晨 (5:00—6:00) 和夜间 (22:00—23:00) 的臭气体质量浓度最低, 这与农村灰水的时间排放特征有关。OU、 C_8H_8 、 C_2SH_6 、 $C_2H_6S_2$ 、 NH_3 、 H_2S 和 C_3H_9N 在早晨、中午和傍晚的质量浓度超过《恶臭污染物排放标准 GB 14554-93》中排放限定值, 而在清晨和夜间质量浓度不超标, 这一现象与农村用水习惯有关。根据相关性分析结果(表 2)可知, 时间尺度上的恶臭气体质量浓度变化与水量变化具有显著正相关性。农户早晨、中午和傍晚会产生较多的污水^[38-39], 收集系统中的恶臭气体质量浓度随水量的提升而升高, 水量提升加大了水流的湍动, 也提高了水管中运行水位, 使得管道充满度增大, 进一步促进了恶臭组分向空气中逸散^[40], 因此收集系统在该时间段逸散的恶臭质量浓度较大。对 5 个时间段的 OU、 H_2S 、 C_8H_8 、 C_2SH_6 、 $C_2H_6S_2$ 、 NH_3 和 C_3H_9N 值进行差异显著性检验发现, 该 5 个时间段的恶臭气体质量浓度存在极显著差异 ($P < 0.001$), 这从数理统计的角度确认了农村重力流灰水收集系统的恶臭气体质量浓度确实呈现显著的 M 形时间分布。

2.3 空间尺度上恶臭气体分布规律

选择排水量最大的时间段 (早晨 6:00—8:00) 对农村重力流灰水收集系统进行恶臭气体沿程检测, 具体数据见表 3。如图 8 所示, 不同恶臭气体在空间上的整体趋势亦表现出 M 形特征, 即恶臭气体质量浓度最大值出现在跌水井处, 跌水井下游恶臭气体质量浓度迅速下降, 待到收集系统变径时 (即由 DN100 扩大至 DN150) 恶臭气体质量浓度又明显上升, 而后质量浓度继续下降。具体而言, 灰水收集系统最大 OU 值出现在跌水井处, 约为 3 200, 为其上下游区域平均值的 1.2 倍, 最小值在系统出口处, 约为 50, 二者相差了 64 倍。OU 值的另一个明显高峰出现在管道变径处 (即由 DN100 扩大至 DN150), 其平均 OU 值是其上下游区域平均值的 1.6 倍。整体而言, 灰水系统恶臭气体主要集中在跌水井附近, 这是因为跌水造成的剧烈湍动和水气物质交换迫使灰水中的恶臭组分大量向收集系统气相逸散^[40]。管道变径处的恶臭气体质量浓度上升是因为此处因管径陡然增



注：采用非参数Kruskal-Wallis H检验法($P < 0.05$)进行统计检验,*表示 $P < 0.05$ 。

图7 收集系统时间尺度恶臭分布规律

Fig. 7 Odor distribution pattern at a time scale in the collection system

表 2 流量与恶臭质量浓度的相关性表

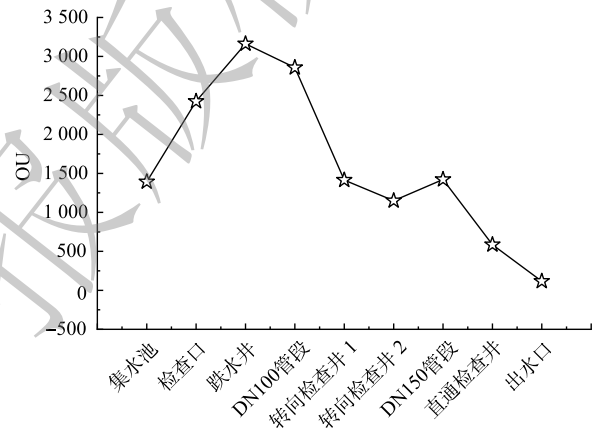
Table 2 Correlation table between flow rate and odor concentration

项目	流量	OU	H ₂ S	NH ₃	C ₈ H ₈	C ₃ H ₉ N	C ₂ SH ₆	C ₂ H ₆ S ₂
流量	1	0.719**	0.689**	0.638**	0.687**	0.634**	0.800**	0.729**
OU		1	0.971**	0.933**	0.955**	0.905**	0.913**	0.941**
H ₂ S			1	0.951**	0.965**	0.924**	0.898**	0.960**
NH ₃				1	0.941**	0.962**	0.872**	0.962**
C ₈ H ₈					1	0.917**	0.886**	0.954**
C ₃ H ₉ N						1	0.863**	0.938**
C ₂ SH ₆							1	0.907**
C ₂ H ₆ S ₂								1

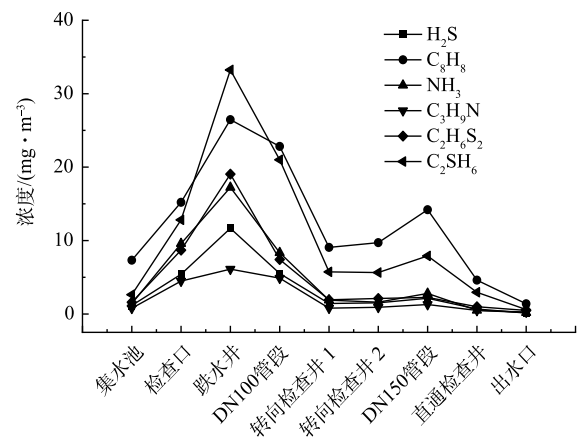
注：**表示在P<0.01 级别上相关性显著。

大造成了空气流速降低、不利于恶臭气体随灰水表面的拖曳力向下游传输^[41]，造成了局部恶臭气体的积聚。在本研究中，所有恶臭气体的质量浓度在跌水井处均达到最大值，其中 C₂SH₆ 质量浓度最高，约为 33 mg·m⁻³，是其他部位质量浓度的 1.58~55.38 倍。有研究^[31]表明，C₂SH₆ 是污水挥发性硫化物 (VSCs) 中典型的恶臭气体之一，其对呼吸系统、眼睛及皮肤有强烈刺激性，易造成头痛、恶心和呕吐^[42]。C₈H₈ 在跌水井的质量浓度仅次于 C₂SH₆，约为 26 mg·m⁻³，是其他部位质量浓度的 1.16~19.04 倍。C₈H₈ 在收集系统沿程的浓度变化较大，但其沿程平均质量浓度 (12.31 mg·m⁻³) 仍明显高于其他恶臭气体。C₃H₉N 在整个沿程过程中平均质量浓度最低 (2.22 mg·m⁻³)，且在沿程的质量浓度变化波动最小。

JIANG 等^[43] 对多座城市污水处理厂中的异味气体进行了综合分析，结果表明城市污水处理厂的异味气体质量浓度变化很大，NH₃、H₂S、甲硫醇(CH₄S)、C₂SH₆、CS₂ 和 C₂H₆S₂ 的质量浓度分别为 0~1 500、0.1~20 480、0.4~2.4、0.4~5 450、3.06~9.82 和 0.62~1 600 ug·m⁻³，污水处理系统的异味气体质量浓度变化幅度较大，本研究中收集系统的异味气体质量浓度变化范围也很大，同时部分气体的质量浓度大于处理系统，进一步表明了对收集系统进行异味研究和控制的必要性。值得注意的是，H₂S 在许多研究中被认为是污水收集系统中非常重要的恶臭气体^[44]，本研究结果表明，农村重力流灰水收集系统中平均质量浓度和质量浓度变化最大的恶臭气体组分为 C₈H₈，其次是 C₂SH₆。因此，对于农村灰水收集系统的运维过程，不仅要关



(a) 沿程尺度OU值



(b) 沿程尺度恶臭值

图 8 收集系统沿程恶臭分布规律

Fig. 8 Distribution pattern of odor along the collection system

注：H₂S 在许多研究中被认为是污水收集系统中非常重要的恶臭气体^[44]，本研究结果表明，农村重力流灰水收集系统中平均质量浓度和质量浓度变化最大的恶臭气体组分为 C₈H₈，其次是 C₂SH₆。因此，对于农村灰水收集系统的运维过程，不仅要关

表3 不同位置异味质量浓度参数
Table 3 Odor concentration parameters at different positions

检测 结果	OU								
	集水池	检查口	跌水井	DN100管段	转向检查井1	转向检查井2	DN150管段	直通检查井	出水口
范围	1 138.8~1 826.42	001.6~3 704.63	216~4 677.2	395.8~3 606.41	052.2~1 644.6	555.6~1 878.6	532.8~2 223.6	314.4~1 000.2	63.6~206.4
均值	1 392.47	2 423.87	3 162.73	2 856.80	1 414.43	1 149.20	1 421.6	586.07	116.5
标准差	308.30	922.96	1 258.70	534.70	259.25	548.58	692.99	297.55	63.90
检测 结果	$H_2S/(mg \cdot m^{-3})$								
	集水池	检查口	跌水井	DN100管段	转向检查井1	转向检查井2	DN150管段	直通检查井	出水口
范围	0.30~1.82	3.68~6.86	3.01~17.69	0.23~14.47	0.58~2.14	0.77~2.33	0.70~3.86	0.33~1.02	0.05~0.22
均值	1.16	5.41	11.67	5.51	1.42	1.52	2.14	0.68	0.12
标准差	0.49	1.31	6.28	5.40	0.50	0.72	1.30	0.40	0.07
检测 结果	$C_8H_8/(mg \cdot m^{-3})$								
	集水池	检查口	跌水井	DN100管段	转向检查井1	转向检查井2	DN150管段	直通检查井	出水口
范围	1.70~8.28	0.06~40.14	0.06~87.04	1.50~13.54	5.78~13.54	4.23~14.60	3.93~27.20	0.76~9.32	0.89~1.90
均值	7.32	15.21	26.47	22.82	9.07	9.72	14.20	4.61	1.39
标准差	4.52	14.75	32.41	14.72	2.94	4.28	9.69	3.55	0.41
检测 结果	$NH_3/(mg \cdot m^{-3})$								
	集水池	检查口	跌水井	DN100管段	转向检查井1	转向检查井2	DN150管段	直通检查井	出水口
范围	0.34~2.84	6.97~13.32	4.02~26.06	0.42~22.54	0.32~3.45	0.11~3.30	0.31~5.90	0~1.11	0~0.48
均值	1.42	9.59	17.24	8.35	1.89	1.62	2.80	0.50	0.18
标准差	0.82	2.71	9.52	8.47	1.08	1.36	2.32	0.46	0.21
检测 结果	$C_3H_9N/(mg \cdot m^{-3})$								
	集水池	检查口	跌水井	DN100管段	转向检查井1	转向检查井2	DN150管段	直通检查井	出水口
范围	0.25~1.29	3.16~5.67	2.19~9.12	1.76~9.26	0.09~1.20	0.19~1.78	0.17~2.65	0~0.91	0~0.26
均值	0.78	4.48	6.10	4.88	0.80	0.92	1.29	0.49	0.09
标准差	0.38	1.03	2.90	3.19	0.43	0.70	1.03	0.37	0.12
检测 结果	$C_2H_6S_2/(mg \cdot m^{-3})$								
	集水池	检查口	跌水井	DN100管段	转向检查井1	转向检查井2	DN150管段	直通检查井	出水口
范围	0.36~3.52	5.60~14.46	6.49~35.96	0.58~15.46	0.39~3.02	0.61~4.31	0.75~7.75	0.14~3.87	0~1.25
均值	1.59	8.69	19.05	7.41	1.93	2.12	3.76	1.65	0.49
标准差	1.05	4.08	12.42	5.63	1.05	1.54	2.94	1.60	0.55
检测 结果	$C_2SH_6/(mg \cdot m^{-3})$								
	集水池	检查口	跌水井	DN100管段	转向检查井1	转向检查井2	DN150管段	直通检查井	出水口
范围	0.07~7.20	0.06~32.86	7.91~62.66	8.57~33.20	5.14~6.24	1.73~7.67	1.63~16.80	0.40~6.46	0.05~1.08
均值	2.64	12.81	33.24	20.99	5.73	5.64	7.91	2.95	0.61
标准差	2.64	12.16	22.54	10.06	0.45	2.76	6.46	2.57	0.43

注 H_2S 的质量浓度变化, 也要关注 C_8H_8 和 C_2SH_6 等气体的质量浓度变化, 仅仅通过技术手段控制 H_2S 的产生并不一定能够实现可靠的恶臭控制效果, 还需要对 C_8H_8 和 C_2SH_6 等气体进行控制。

2.4 建议与展望

近年来,排水系统的恶臭问题虽然已经受到众多学者的关注,但其研究主要集中在硫化氢和氨气等常规恶臭气体方面,对其他各类恶臭物质的生成、释放规律和控制方法关注较少,相关研究仍处于起步阶段。本研究虽然对农村重力流灰水收集系统的多种恶臭气体进行了研究,但仍有许多值得在未来深入开展的工作:本研究对中试系统的异味进行了时空规律的探索,而实际工程中排水管道气相和液相条件复杂多变,且不同环境因素对异味的产生和分布也有一定影响,仅靠中试研究的结论尚不足以全面支撑相关控制措施的提出和改良,因此,未来应关注实际工程应用过程中的异味分布规律,并针对不同异味的产生机制、分布规律和各种环境因素的影响开展深入分析,提出不同异味的控制方法。

3 结论

1) 灰水在相对静止状态下逸散出的恶臭气体质量浓度排序为 $C_8H_8 > C_2SH_6 > C_2H_6S_2 > NH_3 > H_2S > C_3H_9N > CS_2$, 灰水储水池恶臭气体在贴近水面处质量浓度最低,臭气主要集中在储水池距离地面约 0.5 m 处。

2) 农村重力流灰水收集系统的恶臭气体在时间上呈 M 形分布,即恶臭气体在早晨 (6:00—8:00) 和傍晚 (17:00—19:00) 的质量浓度较高,这与农村灰水排放量的时间特性有关。

3) 农村重力流灰水收集系统的恶臭气体在空间上表现出跌水井和管道变径处恶臭气体质量浓度较高,但这两处的成因不同。在农村重力流灰水收集系统的运维过程中,不仅要关注 H_2S 质量浓度的变化,也应该关注 C_8H_8 和 C_2SH_6 等气体的质量浓度变化。

参考文献

- [1] 李文凯, 郑天龙, 刘俊新. 农村小管径重力流灰水管道中生物膜细菌群落的特征[J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 691-700.
- [2] BUTKOVSKYI A, NI G, LEAL L H, et al. Mitigation of micropollutants for black water application in agriculture via composting of anaerobic sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 303: 41-47.
- [3] HARDER R, WIELEMAKER R, LARSEN T A, et al. Recycling nutrients contained in human excreta to agriculture: pathways, processes, and products[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49(8): 695-743.
- [4] ZIEMBA C, LARIVÉ O, DECK S, et al. Comparing the anti-bacterial performance of chlorination and electrolysis post-treatments in a hand washing water recycling system[J]. *Water Research X*, 2019, 2: 100020.
- [5] KULANDAISWAMY N D M, NITHYANANDAM M, PALANIVEL V. Household greywater treatment using phytoremediation technology and CapsNet model[J]. *Plant and Soil*, 2022, 478(1-2): 731-745.
- [6] MAIMON A, GROSS A. Greywater: Limitations and perspective[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 2: 1-6.
- [7] SHAIKH I N, AHAMMED M M. Quantity and quality characteristics of greywater: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110266.
- [8] BOYJOO Y, PAREEK V K, ANG M. A review of greywater characteristics and treatment processes[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(7): 1403-1424.
- [9] KOZMINYKH P, HEISTAD A, RATNAWEERA H C, et al. Impact of organic polyelectrolytes on coagulation of source-separated black water[J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(14): 1723-1732.
- [10] LARSEN T A, GRUENDL H, BINZ C. The potential contribution of urine source separation to the SDG agenda: A review of the progress so far and future development options[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2021, 7(7): 1161-1176.
- [11] JIN P, SHI X, SUN G, et al. Co-variation between distribution of microbial communities and biological metabolization of organics in urban sewer systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(3): 1270-1279.
- [12] LI W, ZHENG T, MA Y, et al. Current status and future prospects of sewer biofilms: Their structure, influencing factors, and substance transformations[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695: 133815.
- [13] HE Q, YIN F, LI H, et al. Suitable flow pattern increases the removal efficiency of nitrogen in gravity sewers: a suitable anoxic and aerobic environment in biofilms[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 15743-15753.
- [14] JIN P, WANG B, JIAO D, et al. Characterization of microflora and

- transformation of organic matters in urban sewer system[J]. *Water Research*, 2015, 84: 112-119.
- [15] ZHAO N, NGO H H, LI Y, et al. A comprehensive simulation approach for pollutant bio-transformation in the gravity sewer[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13: 1-12.
- [16] NIELSEN A H, HVITVED - JACOBSEN T, VOLLERTSEN J. Effect of sewer headspace air - flow on hydrogen sulfide removal by corroding concrete surfaces[J]. *Water Environment Research*, 2012, 84(3): 265-273.
- [17] PARK K, LEE H, PHELAN S, et al. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: A review[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 95: 251-261.
- [18] LI R, HAN Z, SHEN H, et al. Volatile sulfur compound emissions and health risk assessment from an A²O wastewater treatment plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148741.
- [19] CARRERA L, SPRINGER F, LIPEME-KOUYI G, et al. Influence of relative air/water flow velocity on oxygen mass transfer in gravity sewers[J]. *Water Science & Technology*, 2017, 75(7): 1529-1538.
- [20] FUENTES M, SONG H R, GHOSH S K, et al. Spatial association between speciated fine particles and mortality[J]. *Biometrics*, 2006, 62(3): 855-863.
- [21] LEE M, WI J, KOZIEL J A, et al. Effects of uv-a light Treatment on ammonia, hydrogen sulfide, greenhouse gases, and ozone in simulated poultry barn conditions[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(3): 283.
- [22] LIU Z. Urban sewage treatment odor gas release characteristics and regional differences[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 21: 101190.
- [23] 张涛. 城市排污管道有害气体分布规律与危害控制研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2016.
- [24] HAMODA M F, ALSHALAHI S F. Assessment of hydrogen sulfide emission in a wastewater pumping station[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(6): 352.
- [25] SIGGINS A, BURTON V, ROSS C, et al. Effects of long-term greywater disposal on soil: A case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557: 627-635.
- [26] YANG Z, ZHU D Z, YU T, et al. Case study of H₂S release and transport in a trunk sewer with drops[J]. *Water Science & Technology*, 2020, 82(11): 2271-2281.
- [27] EDWINI-BONSU S, STEFFLER P. Modeling ventilation phenomenon in sanitary sewer systems: A system theoretic approach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(8): 778-790.
- [28] 周建明, 全斐, 赵春杰, 等. 基于有害气体监测的多作业面隧道通风管理[J]. *中国铁路*, 2021, 705(03): 26-32.
- [29] KNIGHT M A, IOANNIDIS M A, SALIM F, et al. Health risks assessment from cured-in-place pipe lining fugitive styrene emissions in laterals[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2023, 14(1): 04022056.
- [30] WANG B, SIVRET E, PARCSI G, et al. Reduced sulfur compounds in the atmosphere of sewer networks in Australia: geographic (and seasonal) variations[J]. *Water Science & Technology*, 2014, 69(6): 1167-1173.
- [31] SIVRET E C, WANG B, PARCSI G, et al. Prioritisation of odorants emitted from sewers using odour activity values[J]. *Water Research*, 2016, 88: 308-321.
- [32] PANDEY S K, KIM K-H, KWON E E, et al. Hazardous and odorous pollutants released from sewer manholes and stormwater catch basins in urban areas[J]. *Environmental Research*, 2016, 146: 235-244.
- [33] HUANG C-H, CHEN K-S, WANG H-K. Measurements and PCA/APCS analyses of volatile organic compounds in Kaohsiung municipal sewer systems, southern Taiwan[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12(6): 1315-1326.
- [34] TEIXEIRA J V, MIRANDA S, MONTEIRO R A, et al. Assessment of indoor airborne contamination in a wastewater treatment plant[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185: 59-72.
- [35] DINCER F, MUEZZINOGLU A. Odor-causing volatile organic compounds in wastewater treatment plant units and sludge management areas[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2008, 43(13): 1569-1574.
- [36] BOLDEN A L, KWIATKOWSKI C F, COLBORN T. New look at BTEX: are ambient levels a problem?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(9): 5261-5276.
- [37] DURMUSOGLU E, TASPINAR F, KARADEMIR A. Health risk assessment of BTEX emissions in the landfill environment[J]. *Journal of Hazard Mater*, 2010, 176(1-3): 870-877.
- [38] 贺墨梅, 刘焱. 污水集中式与分散式处理技术的比较研究[J]. *西南给排水*, 2006, 28(4): 20-23.
- [39] 刘中, 金树权, 罗艳. 宁波地区农村生活污水产污特征分析研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(10): 1127-1130.
- [40] 谷天峰. 排水系统恶臭污染及挥发性有机物的控制效果与机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [41] LIU Y, NI B-J, GANIGUÉ R, et al. Sulfide and methane production in sewer sediments[J]. *Water Research*, 2015, 70: 350-359.
- [42] 李伟芳, 耿静, 翟增秀, 等. 恶臭物质的嗅觉阈值与致臭机理研究概况与展望[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(3): 327-330.
- [43] JIANG G, MELDER D, KELLER J, et al. Odor emissions from domestic wastewater: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2017, 47(17): 1581-1611.
- [44] SMET E, LENS P, LANGENHOVE H V. Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur compounds[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1998, 28(1): 89-117.

(责任编辑: 曲娜)

Spatial and temporal distribution patterns of malodorous gases in rural gravity-flow graywater collection systems

LIU Jianguo¹, LYU Jinxin^{1,2}, LI Wenkai³, ZHU Chang^{1,2}, MEN yingxin¹, HU Fan¹, ZHENG Tianlong^{2,*}, CAO yingnan^{1,2,*}, LIU junxin²

1. Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Department of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. SCEGC No. 12 Construction Engineering Group Co. Ltd., Ankang 725000, China

*Corresponding author, E-mail: tlzheng@rcees.ac.cn; caoyingnan@imut.edu.cn;

Abstract In order to investigate the spatial and temporal distribution patterns of malodorous gases in the rural gravity-flow graywater collection system, a pilot study set was constructed and the malodorous gas concentrations of the whole process were investigated. The results shows that styrene (C₈H₈) was the odorous gas with the highest concentration (average concentration of 55.68 mg·m⁻³) and carbon disulfide (CS₂) had the lowest concentration (average concentration of 0.11 mg·m⁻³) in the relatively stationary grey water storage tank; The grey water collection system had a higher concentration of malodorous gases in the morning (6:00—8:00) and evening (17:00—19:00), and its OU average concentration was 1.82~23.7 times and 1.87~24.41 times higher than the OU average concentration in other periods, respectively. Higher concentration of malodorous gases occurred at the drop wells and pipe reducers in the grey water collection system, and their OU average concentrations were 1.2 times and 1.6 times of the OU average concentrations in the upstream and downstream areas, respectively. During the operation and maintenance of the rural gravity flow graywater collection system, the concentration changes in gases such as C₈H₈ and C₂SH₆ should be paid attention to in order to better control the odor fugitive problem.

Keywords grey water; collection system; odor; time distribution; space distribution